LES DICTIONNAIRES DU SAVOIR MODERNE

la physique

Des particules à la molécule... plasmas, électronique, optique...

Sous la direction de Roland Guillemard
Renee Beinse, Jacques Burko, Patrick Golicki, Jacques Lafait, René Launay, Fernand Lot
Alain Marraud, Roland Omnès, Pierre Prétet, André Samain

LES IDEES > LES ŒUVRES > LES HOMMES

comment lire le présent volume

Bien entendu, nous ne prétendons pas vous apprendre à lire les lettres de notre alphabet et les mots de notre vocabulaire.

Mais la lecture, pour l'« honnête homme » du XXe siècle, c'est beaucoup plus : c'est, entre autres, une technique d'information aussi efficace que possible — aussi efficace, mais également aussi personnelle.

Votre droit de *lecteur adulte* est de lire le sujet traité dans cet ouvrage, en fonction — non pas des préoccupations des auteurs — mais de *vos préoccupations*, de vos besoins, de vos désirs.

La structure de cet ouvrage, dénommée « Algo-livre », a été conçue pour permettre cette lecture libre et totale — sans pour autant dénaturer la pensée des auteurs.

Vous pouvez utiliser ce livre en pratiquant soit une lecture continue d'information générale, soit une lecture sélective de recherche; vous pouvez ou négliger ou retenir les renseignements spécialisés, de nature technique ou scientifique.

Vous trouverez en pages 4 et 5 du présent ouvrage le mode d'utilisation détaillé de l'Algo-livre.

En voici les principaux points :

- Les articles essentiels — au nombre d'une dizaine — sont repérés sur la tranche du volume par des onglets permettant de les séparer avec le pouce; la table de ces articles, classés suivant un ordre raisonné d'exposition, figure en page 3.

© *by* Centre d'Étude et de Promotion de la Lecture
Paris, 1971.

LA PHYSIQUE

LES DICTIONNAIRES DU SAVOIR MODERNE

Neuf articles essentiels présentés page ci-contre ▶

... et 500 termes et biographies classés par ordre alphabétique
avec leurs équivalents anglais, récapitulés en fin de volume dans un index anglais-français, **constituent ce dictionnaire de physique**

Comment se servir de cette encyclopédie et utiliser le système des onglets : voir pages suivantes

1	Évolution des idées en physique :	**Historique** par Fernand Lot
2	Les constituants élémentaires de l'univers :	**La physique des hautes énergies : les particules** par Roland Omnès
3	L'assemblage complexe des particules :	**L'atome** par Patrick Golicki
4	Le quatrième état de la matière :	**La physique des plasmas** par André Samain
5	Les édifices atomiques :	**Le cristal** par Alain Marraud
6	Les liaisons entre atomes :	**La chimie** par Jacques Burko
7	Une découverte fondamentale, l'électron :	**Électricité et magnétisme** par Renée Bense et Roland Guillemard
8	La transmission de l'information :	**L'électronique** par Pierre Prétet et René Launay
9	Nature et propagation de la lumière :	**L'optique** par Jacques Lafait

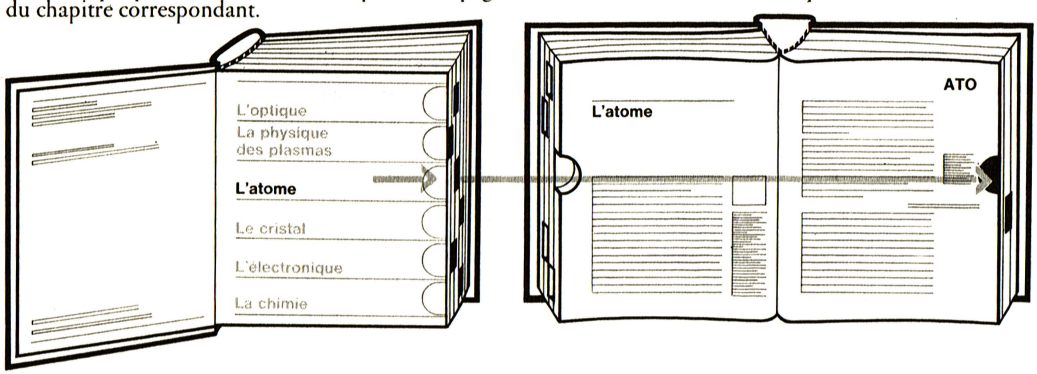
Comment utiliser cette

La structure originale de cet ouvrage, dénommée « Algo-livre », est conçue pour vous permettre de le consulter avec la même simplicité et le même profit, quels que soient votre objectif de lecture et votre niveau de connaissances.
Vous pouvez utiliser cette encyclopédie en pratiquant soit une lecture continue

1 Lecture continue d'information générale

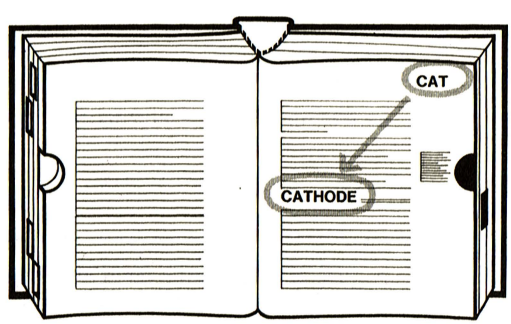
Consultez la page précédente. Elle vous présente le sommaire d'un traité complet sur la physique, réparti en neuf chapitres : du chapitre premier « Historique » au chapitre neuvième « L'optique ». A chacune des neuf lignes de ce sommaire correspond sur la tranche verticale droite du volume une encoche qui permet de localiser la première page du chapitre correspondant.

Par exemple, pour lire le chapitre sur « L'atome », il suffit, sur la page précédente, de déplacer un doigt horizontalement de la gauche vers la droite à hauteur de la ligne « L'atome » ; le doigt tombe dans une encoche qui permet automatiquement d'ouvrir le livre à la page 32, première page de l'article sur « L'atome », écrit par Patrick Golicki.



2 Lecture sélective de recherche

Pour vous informer sur un sujet particulier, utilisez le présent ouvrage à la façon d'un dictionnaire traditionnel. Tous les articles, aussi bien les études générales de plusieurs dizaines de pages (par exemple l'article sur « La physique des plasmas ») que les définitions de quelques lignes (par exemple « cathode », page 95), aussi bien les lois physiques (par exemple « Gravitation » page 274) que les biographies des physiciens (par exemple « Einstein », page 182), sont en effet classés alphabétiquement.
Il suffit, pour les trouver, de feuilleter ce livre en repérant les trois lettres imprimées en haut et à droite de chaque page (de droite), qui correspondent aux trois premières lettres des mots définis dans cette page.

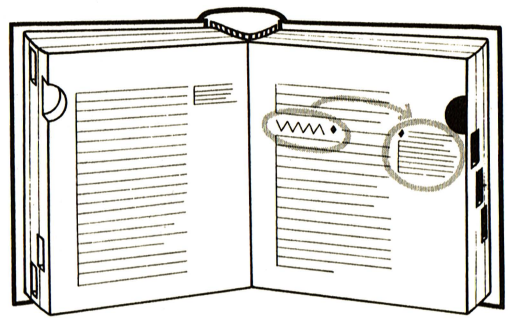


encyclopédie avec le meilleur profit

d'information générale, soit une lecture sélective de recherche; vous pouvez ou négliger ou retenir les renseignements spécialisés de nature technique ou scientifique; mais, quel que soit votre mode de lecture, il vous est toujours possible de repérer aisément les liaisons entre des notions apparemment distinctes, mais néanmoins interdépendantes.

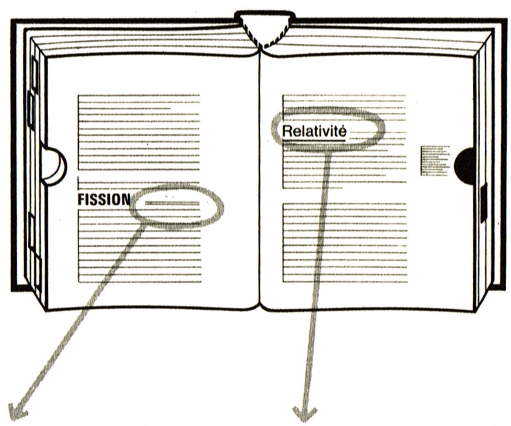
3 Textes annexes : notes marginales

Les articles de cet ouvrage ont été écrits sans jamais sacrifier à une vulgarisation déformante ou à des simplifications abusives, mais ils ont aussi été rédigés pour être compris, assimilés sans effort anormal par tout lecteur doté d'une culture générale moyenne et démuni de toute « formation scientifique ».
Afin de faciliter votre tâche, tous les renseignements, qui bien qu'utiles ne sont pas nécessairement indispensables, ont été séparés du texte principal, composés dans un caractère plus petit, placés en marge, à la hauteur du « mot signal ».
Ce « mot signal » est repéré par un losange noir.
On retrouve ainsi sous une forme moderne l'équivalent des « gloses » des manuscrits du Moyen Âge et des livres imprimés de la Renaissance.



4 Index général des mots

En rencontrant dans cet ouvrage certains termes vous éprouverez le besoin de consulter les autres pages du présent livre où ces mêmes termes sont cités : soit définis, soit développés, soit commentés.
Dans les ouvrages traditionnels, cette fonction est remplie par un index alphabétique placé en fin de volume.
La structure « Algo-livre » vous permet de trouver directement ces renseignements, sans l'obligation de compulser un cahier terminal d'index.
1. Les mots soulignés dans le cours du texte renvoient à ces mêmes mots, définis dans le dictionnaire.
2. Un index complémentaire est donné immédiatement après chacun des mots du dictionnaire.



Un index complémentaire est donné immédiatement après chacun des mots du dictionnaire.

Les mots soulignés dans le texte font l'objet d'une définition dans le dictionnaire.

Les dictionnaires du savoir moderne

Cette collection est publiée par
la Bibliothèque du Centre d'Étude
et de Promotion de la Lecture
Conçue par François Richaudeau,
elle est réalisée sous la direction de Jean Feller,
assistés par Yvette Pesez.

Marie-Noëlle Fustec en assure le secrétariat de rédaction
et la fabrication
Ulrich Meyer, de Hollenstein Création,
les maquettes de reliure et de mise en pages.

La Bibliothèque du CEPL

La physique

Ouvrage réalisé sous la direction de
Roland Guillemard

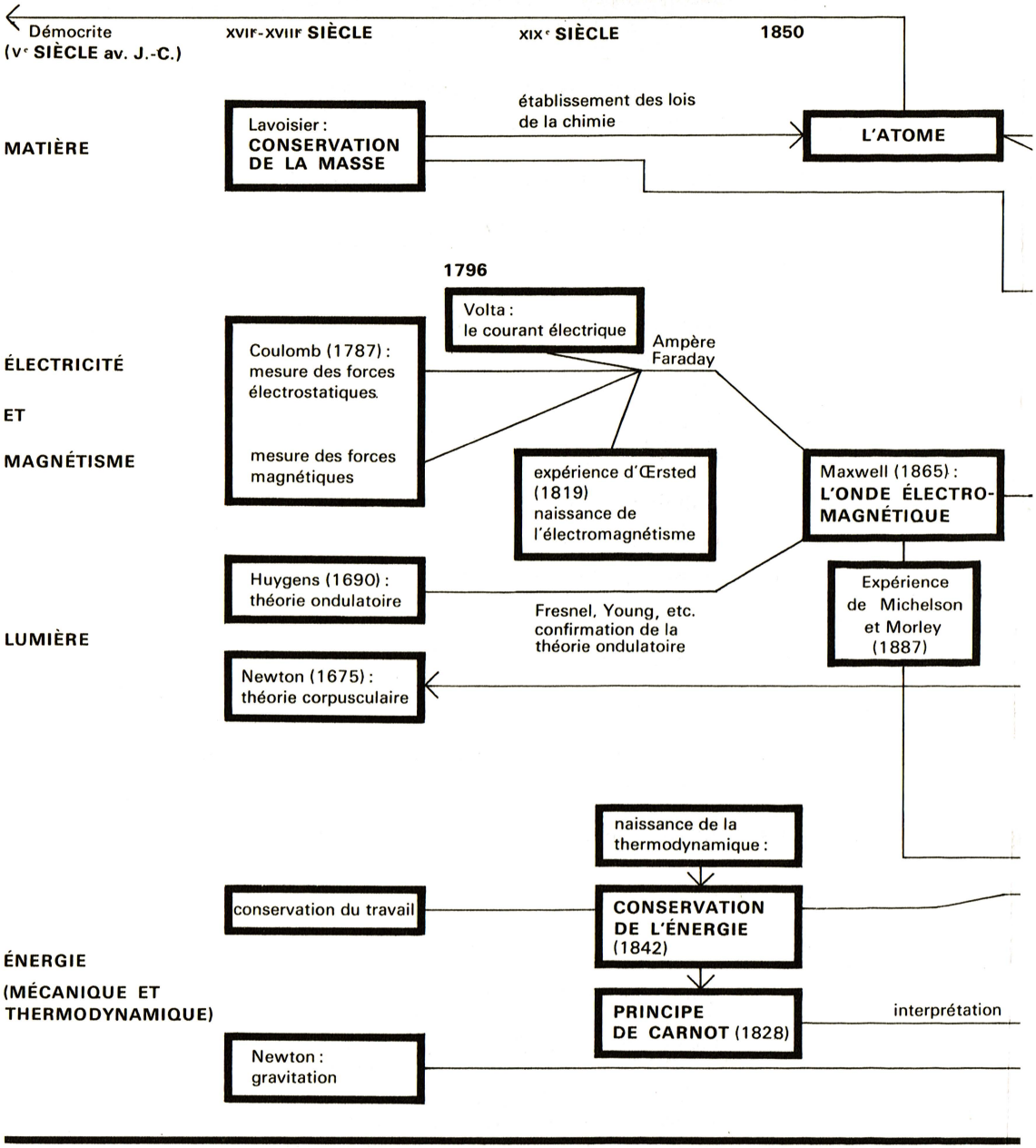
Ont rédigé les articles principaux :

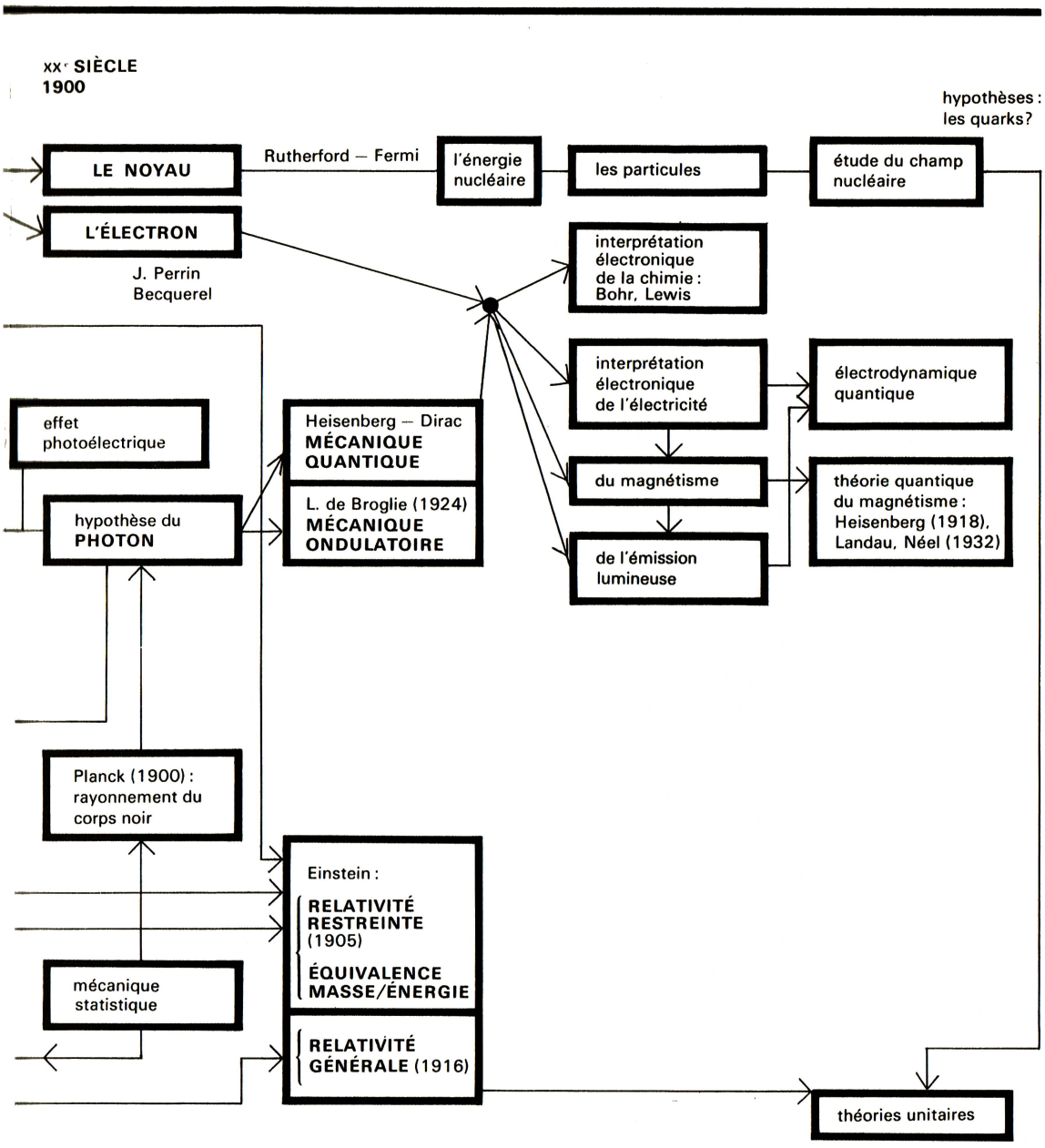
Renée Bense	Agrégée de l'Université
Jacques Burko	Ingénieur chimiste
Patrick Golicki	Ingénieur de l'aéronautique
Roland Guillemard	Agrégé de l'Université
Jacques Lafait	Licencié ès sciences physiques attaché de recherches au C.N.R.S.
René Launay	Ingénieur de l'École supérieure d'électricité (É.S.É)
Fernand Lot	Écrivain et journaliste lauréat de l'Académie des sciences et de l'Académie française
Alain Marraud	Docteur ès sciences chargé de recherches au C.N.R.S.
Roland Omnès	Professeur de l'Université de Paris (Orsay)
Pierre Prétet	Ingénieur de l'École nationale supérieure de mécanique et d'aéronautique (E.N.S.M.A.)
André Samain	Ancien élève de l'École normale supérieure

Ont rédigé le dictionnaire
Pour les auteurs : Francine Achaz
Pour les définitions : Roland Guillemard

Les dessins ont été exécutés
par Philippe Bully et Daniel Letur

Grands courants de la physique




XXe SIÈCLE
1900
hypothèses :
les quarks?
LE NOYAU
Rutherford — Fermi
l'énergie nucléaire
les particules
étude du champ nucléaire
L'ÉLECTRON
J. Perrin
Becquerel
interprétation électronique de la chimie : Bohr, Lewis
interprétation électronique de l'électricité
électrodynamique quantique
effet photoélectrique
Heisenberg — Dirac
MÉCANIQUE QUANTIQUE
du magnétisme
théorie quantique du magnétisme : Heisenberg (1918), Landau, Néel (1932)
hypothèse du PHOTON
L. de Broglie (1924)
MÉCANIQUE ONDULATOIRE
de l'émission lumineuse
Planck (1900) : rayonnement du corps noir
Einstein :
RELATIVITÉ RESTREINTE (1905)
ÉQUIVALENCE MASSE/ÉNERGIE
mécanique statistique
RELATIVITÉ GÉNÉRALE (1916)
théories unitaires

Avertissement

Nous conseillons au lecteur de lire :

1
les articles principaux dans l'ordre
donné en page 5 au début
de l'ouvrage : des Particules à l'Optique.
En respectant la progression
indiquée, le lecteur suivra mieux
les enchaînements qui le mèneront
des particules élémentaires aux structures
les plus complexes.

2
les articles du dictionnaire
proprement dit sans négliger
les notes en marge qui renvoient
à d'autres articles.

De plus, le lecteur trouvera
en page 16, un aperçu mathématique
où sont exposées les notions nécessaires
à la compréhension des différents
articles.
Enfin page ci-contre, un tableau
regroupe les symboles et unités
utilisés en physique.

Symboles et unités

	Symbole	Unité	Grandeur	Symbole	Équation de définition
unités géométriques	m	mètre	*longueur*	l	*fondamentale*
	m^2	mètre carré	surface	S	$S = ll'$
	m^3	mètre cube	volume	V	$V = ll'l''$
	rd	radian	angle plan	α	$\alpha = \frac{l}{R}$
	sr	stéradian	angle solide	Ω	$\Omega = \frac{S}{R^2}$
unités de masse	kg	kilogramme	*masse*	M	*fondamentale*
	kg/m^3	kilogramme par mètre cube	masse volumique	ρ	$\rho = \frac{M}{V}$
unités de temps	s	seconde	*durée (ou temps)*	t	*fondamentale*
	Hz	hertz	fréquence	f	$f = \frac{1}{t}$
unités mécaniques	m/s	mètre par seconde	vitesse	v	$v = \frac{l}{t}$
	m/s^2	mètre par seconde par seconde	accélération	γ	$\gamma = \frac{v}{t}$
	N	newton	force	F	$F = m\gamma$
	J	joule	énergie (y compris chaleur)	W	$W = Fl$
	$m \times N$	mètre par newton	moment d'un couple	M	$M = l.F$
	W	watt	puissance	P	$P = \frac{W}{T}$
	Pa ou N/m^2	pascal ou newton par mètre carré	pression	p	$p = \frac{F}{S}$
unités électriques	A	ampère	*intensité*	I	*fondamentale*
	V	volt	force électromotrice ou tension	E ou V	$E = \frac{W}{I}$
	Ω	ohm	résistance	R	$V = RI$
	C	coulomb	quantité d'électricité ou charge	Q	$Q = It$
	H	henry	inductance	L	$E = L\frac{dI}{dt}$ (variable de I, variable de t)
	Wb	weber	flux magnétique	Φ	$\Phi = LI$
	Wb/m^2	tesla ou weber par mètre carré	induction magnétique	B	$B = \Phi/S$
	F	farad	capacité	C	$Q = CV$

	Symbole	Unité	Grandeur	Symbole	Équation de définition
unités optiques	cd	candela	*intensité lumineuse*	I	*fondamentale*
	lm	lumen	flux lumineux	Φ	$\Phi = I.\Omega$ (Ω = angle solide)
	lx	lux	éclairement	E	$E = \Phi/S$
	cd/m²	candela par mètre carré	luminance d'une source	L	$L = \frac{I}{S}$
unités thermiques	K ou °K	kelvin ♦	température	T	*fondamentale*
	J/Kg °K	joule/kg °K	chaleur massique	C	$C = \frac{W}{M}$

	Symbole	Unité	Grandeur	correspondance avec le système international
autres unités dites aberrantes	kgf	kilogramme-force	1 kgf	= 9,81 N
	dyne	dyne	1 dyne	= 10^{-5} N
	erg	erg	1 erg	= 10^{-7} J
	ch	cheval-vapeur	1 ch	= 736 W
	kgf/cm²	kilogramme-force par centimètre	1 kgf/cm²	= $1{,}013.10^5$ N/m²
	B	bar	1 B	= 10^5 N/m²
	b	barye	1 b	= 10^{-6} bar = 10^{-1} N/m²
	atm	atmosphère	1 atm	= 76 cm de mercure = $1{,}033.10^5$ N/m²
	hpz	hectopièze	1 hpz	= 1 bar
	*e*V	électron-volt	1 *e*V	= $1{,}6.10^{-19}$ joule
	M*e*V	méga électron-volt	1 M*e*V	= 0,0001074 u.m.a.
	μ	micron	1 μ	= 10^{-3} mm
	Å	angström	1 Å	= 10^{-10} m = 10^{-4} micron
	u.m.a.	unité de masse atomique	1 u.m.a.	= 931,16 M*e*V

♦ Le Kelvin est égal au degré Celsius (°C).
La calorie, unité hors système, est tolérée pour les mesures de quantités de chaleur, c'est-à-dire d'énergie (1 cal = 4,18 J).
Il en est de même de la calorie par gramme et par degré, unité de chaleur massique :
1 cal/g °K = $4{,}18.10^{-3}$ J/kg °K.

Remarque :
1 atm
1 kg/cm²
1 bar
1 hpz
sont égaux à de 10^5 N/m² ou voisins de cette valeur.

Symboles et signification des préfixes

Symbole	exemples	nom	multiples
da		déca	× 10
h		hecto	× 100
k	1 kg = 1 000 g	kilo	× 1 000
M	1 M*e*V = 1 méga-électron-volt = 1 000 000 électrons-volts	méga	10^6
G		giga	10^9
T		téra	10^{12}

Symbole	exemples	nom	sous-multiples
d		déci	$\frac{1}{10} = 10^{-1}$
c		centi	$\frac{1}{100} = 10^{-2}$
m		milli	$\frac{1}{1\,000} = 10^{-3}$
μ	$1\ \mu F = \frac{1}{1\,000\,000}$ farad	micro	10^{-6}
n		nano	10^{-9}
p		pico	10^{-12}
f		femto	10^{-15}
at		atto	10^{-18}

Constantes fondamentales

e	charge de l'électron	$1{,}602.10^{-19}$ coulomb
m	masse de l'électron au repos	$0{,}9190.10^{-31}$ kg
$R_0 = \frac{e^2}{m_0c^2}$	rayon classique de l'électron	$2{,}818.10^{-13}$ cm
h $\hbar = \frac{h}{2\pi}$	constante de Planck	$6{,}626.10^{-34}$ joule/seconde $4{,}135.10^{-15}$ électron-volt/seconde
G	constante de gravitation	$6{,}670.10^{-11}$ Nm²/kg²
R	constante des gaz parfaits	8,3143 J/mole.°K
$\mathcal{N}$	nombre d'Avogadro	$6{,}023.10^{23}$
k	constante de Boltzmann $\frac{R}{\mathcal{N}}$	$1{,}380.10^{-23}$ J/°K
c	célérité (ou vitesse) de la lumière dans le vide	$2{,}997\,925.10^{8}$ m/s
ε_0	permittivité du vide	$8{,}854\,37.10^{12}$ unités S.I.
μ_0 $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9.10^9$ $\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^7$	perméabilité du vide	$1{,}256\,54.10^{-6}$ unité S.I.
F	constante de Faraday	96 490 coulombs

Abréviations diverses

C.G.S.	centimètre-gramme-seconde (ancien système d'unités)
d.d.p.	différence de potentiel (ou tension)
f.é.m.	force électromotrice
f.c.é.m.	force contre-électromotrice
K_A	constante d'acidité
pH	potentiel hydrogène (caractérise l'acidité d'une solution)
p_{K_A}	$p_{K_A} = -\log_{10} K_A$
S.I.	système international d'unités (aussi appelé M.K.S.A. : mètre-kilogramme-seconde-ampère)

Signes mathématiques

$\frac{dx}{dt}$	dérivée de x par rapport à t
$\frac{d^2x}{dt^2}$	dérivée seconde de x par rapport à t
dU	différentielle de U
$\frac{\partial U}{\partial x}$	dérivée partielle de U par rapport à x (U fonction de x et d'autres variables y, z, etc.)
$div\ \vec{E}$	divergence du vecteur $\vec{E}$

$\overrightarrow{grad}\ U$	gradient du scalaire U
ΔU	laplacien de U
$\overrightarrow{rot}\ \vec{E}$	rotationnel de $\vec{E}$
$\int f(x)\,dx$	intégrale de $f(x)$; s'énonce : « somme de $f(x)\,dx$ »
$\iint f(x, y)\,dx\,dy$	intégrale de $f(x, y)$; s'énonce : « somme double de $f(x, y)\,dx\,dy$ »
$\iiint f(x, y, z)\,dx\,dy\,dz$	intégrale de $f(x, y, z)$; s'énonce : « somme triple de $f(x, y, z)\,dx\,dy\,dz$ »

Remarque :
Δx représente également une petite variation, ou une incertitude sur la grandeur x. Il n'y a en général pas de confusion possible avec le laplacien.

Alphabet grec

majuscules	minuscules	nom	équivalent	majuscules	minuscules	nom	équivalent
Α	α	alpha	a	Ν	ν	nu	n
Β	β	bêta	b	Ξ	ξ	ksi	x
Γ	γ	gamma	g	Π	ο	omicronn	o
Δ	δ	delta	d	Ο	π	pi	p
Ε	ε	epsilonn	é	Ρ	ρ	rô	r
Ζ	ζ	dzéta	z	Σ	σ	sigma	s
Η	η	êta	ê	Τ	τ	tau	t
Θ	θ	thêta	th	Υ	υ	upsilonn	u
Ι	ι	iota	i	Φ	φ	phi	ph
Κ	κ	kappa	k	Χ	χ	khi	kh
Λ	λ	lambda	l	Ψ	ψ	psi	ps
Μ	μ	mu	m	Ω	ω	oméga	ô

Aperçu mathématique

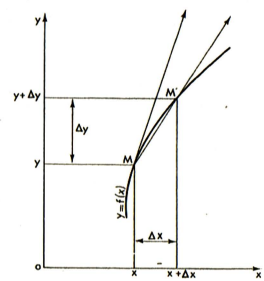
Fonctions et dérivées

On dit que y est une fontion de x lorsque à toute valeur de x correspond une valeur de y, qu'on note : $y = f(x)$. On dit que y est la fonction, et x la variable. Si on fait subir à x un accroissement Δx, y subit un accroissement correspondant Δy.

Le rapport $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ tend en général vers une limite lorsque Δx tend vers zéro.

Cette limite est la « dérivée de y par rapport à x », qu'on note $y' = f'(x) = \frac{dy}{dx}$ (la notation $\frac{dy}{dx}$ rappelle l'origine de la dérivée, dy et dx étant des quantités infiniment petites).

Si y est non seulement fonction de x, mais d'autres variables, la dérivée de y par rapport à x, dite dans ce cas « dérivée partielle », se note : $\frac{\partial y}{\partial x}$.



La dérivée est la pente de la droite passant par M et M' lorsque M' se rapproche indéfiniment de M jusqu'à devenir la tangente en M.

Intégrales

L'intégration est l'opération inverse de la dérivation. Elle consiste à trouver la fonction $Y = F(x)$, qui admet pour dérivée $y = f(x)$. On note $Y = \int f(x)\,dx$ (lire : « somme de $f(x)\,dx$ »).
Si on considère une fonction de plusieurs variables, on définit des intégrales multiples :

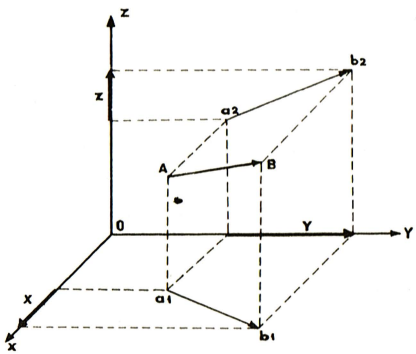
$$G = \iint g(x, y)\,dx\,dy$$

$$H = \iiint h(x, y, z)\,dx\,dy\,dz,$$

permettant de calculer, par exemple, des surfaces ou des volumes.

Vecteurs — Opérations sur les vecteurs

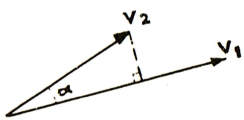
1) *Un vecteur* $\vec{V} = \overrightarrow{AB}$ est un segment de droite orienté. Il est défini dans un système de coordonnées rectangulaires par les coordonnées de son origine A et de son extrémité B, c'est-à-dire par les valeurs algébriques X, Y, Z des projections de AB sur les trois axes. On note quelquefois : $\vec{V}\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$. Bien des grandeurs physiques sont vectorielles : les forces, par exemple, dont il faut définir non seulement l'intensité (longueur du vecteur) mais la direction, le sens sur cette direction et le point d'application (origine).



2) *Produit scalaire* ♦. On appelle produit scalaire de $\vec{V_1}$ par $\vec{V_2}$ le résultat de l'opération suivante, notée $\vec{V_1} \cdot \vec{V_2}$, et énoncée V_1 scalaire V_2 :
on projette $\vec{V_2}$ sur $\vec{V_1}$ et on effectue le produit de la valeur algébrique de $\vec{V_1}$ par celle de la projection de $\vec{V_2}$ sur $\vec{V_1}$:

$$\vec{V_1} \cdot \vec{V_2} = V_1 V_2 \cos \alpha,$$

♦ Scalaire : qui est complètement défini par un nombre.



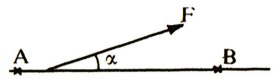
ou, si on se donne les vecteurs par leurs composantes sur les axes :

$$\vec{V}_1 \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix}, \quad \vec{V}_2 \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix}$$

$$\vec{V}_1 . \vec{V}_2 = X_1 X_2 + Y_1 Y_2 + Z_1 Z_2.$$

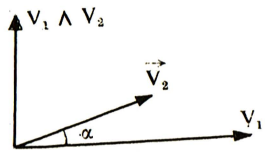
Le produit scalaire est une grandeur algébrique. Par exemple, le travail d'une force : une force $\vec{F}$, se déplaçant le long d'une droite, de A à B, effectue le travail :

$$W = \vec{F} . \overrightarrow{AB} = F.AB.\cos \alpha.$$



Remarque : il est indifférent de faire le produit $\vec{V}_1 . \vec{V}_2$ ou $\vec{V}_2 . \vec{V}_1$, qui conduisent au même résultat : le produit scalaire est « commutatif ».

3) *Produit vectoriel.* Le produit vectoriel de $\vec{V}_1$ par $\vec{V}_2$, pris dans cet ordre, est le résultat de l'opération suivante, notée $\vec{V}_1 \wedge \vec{V}_2$ ou $\vec{V}_1 \times \vec{V}_2$ (énoncé : « V_1 vectoriel V_2 ») :



a) Sur une droite perpendiculaire au plan formé par $\vec{V}_1$ ou $\vec{V}_2$ (ou des vecteurs concourants, équipollents ♦ à $\vec{V}_1$ et $\vec{V}_2$), on imagine un observateur adossé à cette droite et regardant l'extrémité de $\vec{V}_1$, et placé de telle façon qu'il voit à sa gauche l'extrémité de $\vec{V}_2$. Cet observateur définit le sens positif sur cette droite comme celui qui va de ses pieds à sa tête (cet observateur n'est autre que le « bonhomme d'Ampère ♦ »).

♦ Équipollent : parallèle et de même sens.

♦ Voir l'article : Électricité et magnétisme, page 190.

b) On porte sur cette droite et dans ce sens une longueur égale à la mesure de l'aire du parallélogramme construit avec $\vec{V}_1$ et $\vec{V}_2$ comme côtés, d'où il résulte que :

$$\left| \vec{V}_1 \wedge \vec{V}_2 \right| = V_1 V_2 \sin \alpha.$$

De la définition, il découle que $\vec{V}_1 \wedge \vec{V}_2$ n'est pas égal à $\vec{V}_2 \wedge \vec{V}_1$, le sens positif étant inversé : $\vec{V}_1 \wedge \vec{V}_2 = - \vec{V}_2 \wedge \vec{V}_1$. Le produit vectoriel ♦ n'est pas commutatif.

♦ Un exemple physique de produit vectoriel est donné par la loi de Laplace : un conducteur de longueur l parcouru par un courant d'intensité I, placé dans un champ magnétique d'induction $\vec{B}$ est soumis à une force $\vec{F}$ définie par un produit vectoriel $\vec{F} = I \vec{l} \wedge \vec{B}$, $\vec{l}$ étant orienté dans le sens de l'intensité du courant.

♦ Voir Vecteur et, plus précisément, la figure.

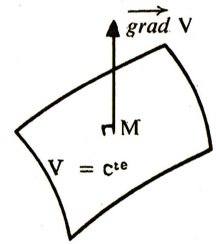
Opérateurs

Gradient d'une fonction V (x, y, z).

C'est un vecteur défini par ses composantes X, Y, Z sur trois axes Ox, Oy, Oz ♦, composantes telles que $X = \dfrac{\partial V}{\partial x}$ $\quad Y = \dfrac{\partial V}{\partial y}$ $\quad Z = \dfrac{\partial V}{\partial z}$.

On note
$$\overrightarrow{grad}\ V = \begin{pmatrix} \dfrac{\partial V}{\partial x} \\ \dfrac{\partial V}{\partial y} \\ \dfrac{\partial V}{\partial z} \end{pmatrix}.$$

Si on considère l'ensemble des points dont les coordonnées x, y, z vérifient $V(x, y, z) = K$, K étant une constante, cet ensemble définit une surface dite « équipotentielle ». Le vecteur $\overrightarrow{grad}\ V$ relatif à un point de cette surface est perpendiculaire à celle-ci.
Un exemple : les météorologistes parlent de gradient de température.



Divergence

Soit un vecteur $\vec{A}$ dont les composantes Ax, Ay, Az sont fonctions de x, y, z.
On appelle divergence de A (« *div* $\vec{A}$ ») le résultat de l'opération :

$$div\ \vec{A} = \frac{\partial Ax}{\partial x} + \frac{\partial Ay}{\partial y} + \frac{\partial Az}{\partial z}.\ \text{C'est un scalaire.}$$

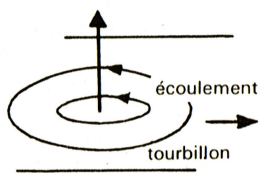
Flux : voir Électricité et magnétisme page 188.

Rotationnel

Soit un vecteur $\vec{A}$. On lui fait correspondre un vecteur $\vec{B} = \overrightarrow{rot}\ \vec{A}$ (rotationnel de A), dont les composantes Bx, By, Bz sur les axes Ox, Oy, Oz sont les suivantes :

$$\overrightarrow{rot}\ \vec{A} = \begin{pmatrix} Bx \\ By \\ Bz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{\partial Az}{\partial y} - \dfrac{\partial Ay}{\partial z} \\ \dfrac{\partial Ax}{\partial z} - \dfrac{\partial Az}{\partial x} \\ \dfrac{\partial Ay}{\partial x} - \dfrac{\partial Ax}{\partial y} \end{pmatrix}$$

Le rotationnel est aussi appelé vecteur tourbillon. Il s'introduit précisément en mécanique des fluides dans l'étude des écoulements : il suffit d'observer un torrent pour voir que l'eau a un mouvement de translation, mais aussi de rotation, ce qui produit des tourbillons d'axe vertical, auxquels on peut associer le vecteur $\vec{B}$ qui est le rotationnel de la vitesse $\vec{V}$ du fluide au point considéré. La condition $\overrightarrow{rot}\ \vec{A} = 0$ exprime, dans le cas d'un écoulement, qu'il n'y a pas de tourbillons. Nous allons en tirer une autre conséquence importante.



Circulation d'un vecteur

La circulation élémentaire dC d'un vecteur $\vec{A}$ le long d'un parcours élémentaire $\overrightarrow{dl}$ est le produit scalaire : $dC = \vec{A} \cdot \overrightarrow{dl}$.
Soit, entre 2 points M et N : $C_M^N = \int_M^N \vec{A} \cdot \overrightarrow{dl}$.
On peut dire, par exemple, que le travail W_M^N d'une force, lorsqu'elle déplace son point d'application de M à N, est la circulation du vecteur $\vec{F}$:

$$W_M^N = \int_M^N \vec{F} \cdot \overrightarrow{dl}.$$

Il peut arriver que cette circulation ne dépende que des limites M et N, et non du trajet suivi entre ces 2 points. En particulier, si on revient au point de départ,

la circulation est nulle. Un vecteur $\vec{A}$ jouissant de cette propriété est dit à circulation conservative ; c'est le cas des forces de pesanteur,
Deux relations, que nous ne démontrerons pas, caractérisent les vecteurs à circulation conservative :

a) On peut trouver une fonction $V(x, y, z)$ telle que :
$\vec{A} = -\overrightarrow{grad}\ V$. V est la fonction potentiel, et on dit que A dérive d'un potentiel.

b) $\overrightarrow{rot}\ \vec{A} = 0$, d'où l'on tire : $\overrightarrow{rot}\left(\overrightarrow{grad}\ V\right) = 0$.

Laplacien de $V(x, y, z)$

C'est un scalaire ♦. Si on dérive V deux fois de suite par rapport à x, on obtient la « dérivée seconde », qu'on note $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}$. On fait de même par rapport à y et à z.

♦ Scalaire : qui est complètement défini par un nombre.

Le laplacien de V, qu'on note ΔV, est donné par la relation :

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}.$$

Bien qu'il soit difficile d'en donner une signification physique immédiate, le laplacien est un opérateur pouvant exprimer le flux d'un vecteur à circulation conservative, par la relation que nous admettons : $\Delta V = div\left(\overrightarrow{grad}\ V\right)$.
Si ce vecteur est à flux conservatif (ce qui n'est pas le cas général), cela se traduira par $\Delta V = 0$.

Logarithme

Le logarithme y d'un nombre réel positif x dans un système de base a positive est l'exposant de la puissance à laquelle il faut élever a pour retrouver le nombre considéré. Ce qui s'écrit : $a^y = x$ ♦, soit : $\log_a x = y$.

♦ C'est la fonction exponentielle.

a) Le logarithme vulgaire ou décimal est celui dont la base a est égale à 10, soit : $\log_{10} x = y$, et $10^y = x$.
Si, par exemple, $y = 2$, on a $10^2 = x = 100$, d'où l'on déduit :
log 100 = 2, et, de la même façon :
log 1 000 = 3
log 10 000 = 4
log 100 000 = 5, etc.

b) Le logarithme naturel ou népérien est celui dont la base repérée par la lettre e est égale à :
$e = 2{,}718\ 281\ 828\ 459...$
Il s'écrit simplement : $\text{Log}\ x = y$. La valeur de e est déduite de la théorie du calcul intégral ; elle est :

$$e = 1 + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \ldots + \frac{1}{n!}\ ♦.$$

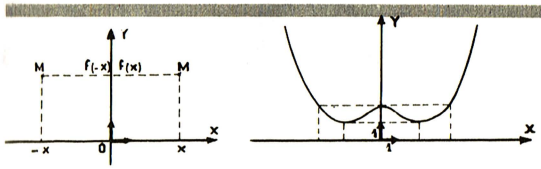
♦ Le signe ! signifie factorielle :
$3! = 1 \times 2 \times 3$
$4! = 1 \times 2 \times 3 \times 4$

Tout logarithme de base a est relié au logarithme népérien (de base e) par la formule : $\log_a x = \frac{\text{Log}\ x}{\text{Log}\ a}$.

Il est alors possible, à partir d'une table de base donnant les valeurs des logarithmes naturels, de calculer tous les logarithmes correspondant à des systèmes de base de valeurs différentes.

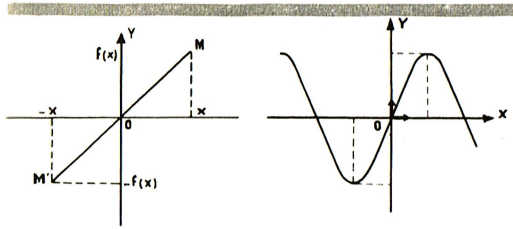
Fonction paire - Fonction impaire

Une fonction f, qui, au nombre réel x, fait correspondre le nombre réel $f(x)$, est dite paire si elle vérifie la propriété suivante :
si $f(x)$ existe, alors $f(-x)$ existe aussi et l'on a : $f(-x) = f(x)$.



La courbe représentative d'une fonction paire dans un repère Ox, Oy est symétrique par rapport à l'axe Oy.

Une fonction f, qui, au nombre réel x, fait correspondre le nombre réel $f(x)$, est dite impaire si elle vérifie la propriété suivante :
si $f(x)$ existe, alors $f(-x)$ existe aussi et l'on a : $f(-x) = -f(x)$.



La courbe représentative en repère orthonormé Ox, Oy d'une fonction impaire f est symétrique par rapport à l'origine.

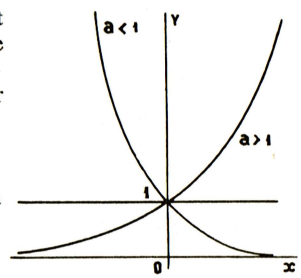
Exponentielle

Considérons un nombre : 10, par exemple. Nous pourrons effectuer l'opération suivante : à la suite des nombres $n = 0, 1, 2, 3, \ldots x$, faisons correspondre la suite des nombres:

$n = 0 \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad \ldots \quad n$

$y = 1 \quad 10^1 \quad 10^2 \quad 10^3 \quad 10^4 \quad \ldots \quad 10^n$

Si l'on porte horizontalement, sur un graphique les valeurs de n, verticalement les valeurs de y, les points représentatifs se rangent sur une courbe qu'on appelle l'exponentielle de base 10, représentation graphique de la fonction $y = 10^x$.
Plus généralement, on peut prendre comme base un nombre a, positif, supérieur ou inférieur à 1.
Mais la forme de la courbe représentative de $y = a^x$ est différente :
— pour $a > 1$, c'est le cas déjà étudié (exponentielle croissante)
— pour $a = 1$, toutes les puissances de 1 sont égales à l'unité ; y conserve la valeur de 1 quel que soit x ;
— pour $a < 1$, que se passe-t-il? Considérons $a = \frac{1}{2}$; $y = \left(\frac{1}{2}\right)^x$.



Notons quelques valeurs de x et les valeurs correspondantes de y :

$x =$	1	2	3	4	5
$y =$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{32}$

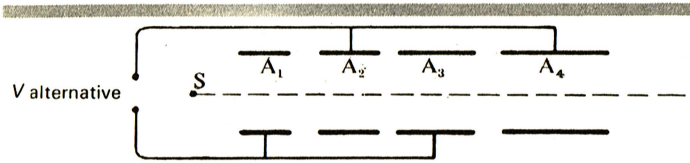
On voit que la courbe représentative est alors rapidement décroissante, les valeurs de y tendant vers zéro. C'est une exponentielle décroissante.
Une valeur de a particulière : $a = 2{,}71828$, qu'on appelle e, est la base des logarithmes népériens.

A

ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE (Lineal accelerator)

Type d'accélérateur dans lequel les particules parcourent un trajet en ligne droite, au cours duquel elles subissent des accélérations successives leur communiquant une vitesse proche de celle de la lumière, avant de les envoyer sur une « cible » où l'on observera les collisions et leurs effets (production d'autres particules, etc.). Un tel appareil comporte un long tube (plusieurs centaines de mètres) où règne un vide poussé. A une extrémité, une source S (protons ou électrons) émet des particules dans l'axe de l'appareil.

Tout le long du tube, se trouvent des anneaux cylindrique A_1, A_2, A_3, A_4, etc., reliés à une source de tension alternative de haute fréquence : lorsque A_1, A_3, etc. (électrodes impaires) sont positives, A_2, A_4.... (paires) sont négatives.



Un proton sortant de A_1 doit trouver A_2 négative ; il est alors accéléré par le champ résultant de la différence de potentiel entre A_1 et A_2. Mais, à la sortie de A_2, il doit trouver A_3 négative : il faut donc régler la fréquence de la tension V et la longueur des électrodes pour que la particule soit soumise à chaque passage d'une électrode à une autre à une accélération.

Par ce procédé, on obtient des énergies de l'ordre du GeV ♦ (1 milliard d'électrons-volts).

♦ Voir note page suivante.

On utilise parfois des accélérateurs linéaires plus modestes pour introduire dans des synchrotrons des particules de vitesse déjà élevées (synchroton de 30 GeV du C.E.R.N., alimenté par un accélérateur linéaire à protons).

ACCÉLÉRATEURS DE PARTICULES ♦ (Accelerator) pages 29, 46, 98, 169, 250, 256, 296, 317, 337, 340, 413, 421, 424, 428, 429, 435, 443, 484, 496, 530.

♦ Pour plus de précisions, lire l'article : l'Atome, page 420.

Comme leur nom l'indique, ce sont des appareils, souvent de dimensions imposantes, servant à communiquer à des particules diverses (électrons, protons, etc.) des vitesses, donc des énergies cinétiques élevées avant de les utiliser comme projectiles sur des « cibles » pour produire des réactions nucléaires.

Il existe deux types d'accélérateurs : les accélérateurs linéaires ♦, où la particule accélérée suit un trajet en ligne droite, et les accélérateurs circulaires, où les particules effectuent un certain nombre de trajectoires circulaires avant d'aboutir à la cible. On trouvera dans cette dernière catégorie les cyclotrons, les synchrocyclotrons, les synchrotrons.

♦ Voir ce mot.

On caractérise les performances des accélérateurs par l'énergie qu'ils communiquent aux particules. Le synchrotron Saturne de Saclay, par exemple, communique aux protons une énergie de 3 milliards d'électrons-volts (3 GeV ♦). A Brookhaven (U.S.A.) et au C.E.R.N. ♦ existent des synchrotrons de 30 GeV et l'U.R.S.S. possède à Doubna un synchrotron de 70 GeV.

♦ 1 GeV = 1 gigaélectron-volt = 1 milliard d'électrons-volts : c'est l'énergie d'un électron accéléré par une tension de 1 milliard de volts.

♦ C.E.R.N. : Conseil européen pour la recherche nucléaire.

ACIDE (Acid) pages 81, 88, 125, 131, 204, 241, 255, 266, 271, 511.

Substance caractérisée par un certain nombre de propriétés telles que :
— une saveur comparable à celle du vinaigre ;
— une action sur des indicateurs colorés ;
— une neutralisation par les bases ;
— une formation de sels avec les métaux ;
— une formation d'esters avec les alcools.

Cette définition chimique s'applique à tous les corps qui s'ionisent en solution aqueuse, produisent des ions hydrogène positifs (H^+), donc des protons. Elle est due à Svante Arrhenius et a subi des généralisations successives.

Pour Brönsted, un acide émet des protons, non seulement dans l'eau, mais dans tout solvant ionisant. De plus, sont considérés comme acides de Brönsted non seulement des molécules comme HCl (acide chlorhydrique), mais des ions tels que NH_4^+ (ammonium) ou HSO_4^- (ion hydrogénosulfate) qui peuvent tous émettre des protons :

$$HCl \rightleftarrows Cl^- + H^+$$

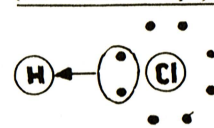
$$NH_4^+ \rightleftarrows NH_3 + H^+$$

$$HSO_4^- \rightleftarrows SO_4^- + H^+$$

Gilbert Newton Lewis admet, quant à lui, qu'un acide est un accepteur de doublet électronique ♦. Ainsi dans l'acide chlorhydrique (HCl), par exemple, c'est le proton H^+ lui-même qui est l'acide, et non HCl, comme dans la théorie de Brönsted. En effet, quand il se lie pour former la molécule HCl, il reçoit deux électrons de l'ion Cl^- qui en possède 8 sur sa couche électronique externe ♦.

La définition de Lewis est valable en dehors de tout solvant ♦.

♦ Doublet électronique : paire de deux électrons dans le même état d'énergie et de spins opposés (voir Liaison chimique).



♦ Voir l'article : l'Atome, page 39.

♦ Dans les conceptions d'Arrhenius et de Brönsted, les propriétés acides apparaissent en solution (dans l'eau pour Arrhenius, dans d'autres solvants pour Brönsted). Pour Lewis, les propriétés acides existent, que la dissolution ait lieu ou non.

Force des acides

Cette notion permet de comparer des solutions acides de même normalité ♦. Plus l'acide est fort, plus les propriétés acides, donc celles du proton H^+, apparaissent. Un acide fort sera donc celui dont toutes les molécules sont ionisées. Un acide faible sera, au contraire, faiblement ionisé. Dans une solution aqueuse à 1/10 mole ♦ par litre d'acide acétique, la proportion des molécules ionisées est de l'ordre de 1 % du nombre total. Cette proportion, ou constante d'ionisation α, caractérise donc la force de l'acide.

En fait, on utilise plutôt la constante d'acidité K_A, liée à α par la relation :

$K_A = \dfrac{C\,\alpha^2}{1-\alpha}$, où C est la concentration d'acide en moles par litre, ou la grandeur $p_{K_A} = -\log_{10} K_A$.

Lorsqu'un acide a plusieurs fonctions acides, on constate que leurs forces sont différentes. Par exemple, l'acide phosphorique H_3PO_4 a 3 fonctions acides :
— la première est moyennement forte ;
— la deuxième est faible ;
— la troisième est très faible.

♦ Normalité acide : nombre d'ions-gramme H^+ que peut émettre 1 litre de solution : HCl à 1 mole par litre est normale. Une solution H_2SO_4 à 1 mole par litre est de normalité 2.

♦ Mole ou molécule-gramme.

ACOUSTIQUE (Acoustics) pages 311, 332, 357, 497.

Cette branche de la physique étudie le son, sa production, sa propagation ainsi que le mécanisme de sa perception L'acoustique rejoint la physiologie, comme elle rejoint l'art lorsqu'il s'agit de combiner les sons — définition même de la musique.

L'apport de l'électronique ♦ à l'acoustique a été considérable : on lui doit aussi bien la reproduction remarquable des sons dans les chaînes haute-fidélité que les prothèses auditives et les instruments électroniques.

♦ Voir cet article, pages 214 à 221 et 224 à 228.

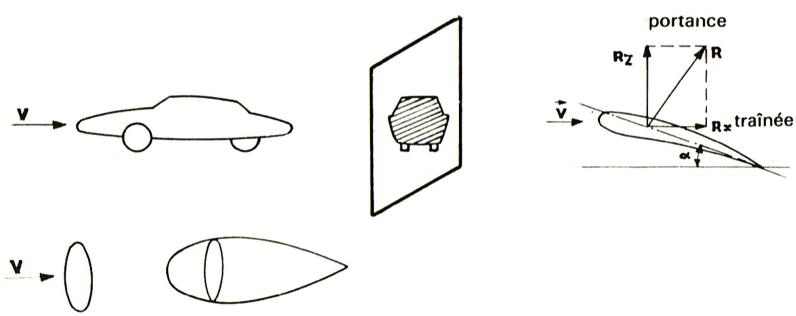
AÉRODYNAMIQUE (Aerodynamics) pages 138, 264, 305, 520.

L'aérodynamique est une science jeune qui est partie de la mécanique des fluides dont le développement a suivi celui de l'aviation (même si la locomotion terrestre à grande vitesse fait de plus en plus appel à l'aérodynamique).

L'aérodynamique étudie donc les écoulements d'un gaz dans un milieu limité (tube) ou autour d'un solide. La présence d'un solide fixe au sein d'un gaz en mouvement ou, ce qui revient au même, le mouvement d'un solide dans un fluide immobile entraîne l'apparition de forces appliquées à ce solide (forces aérodynamiques).

Sur un véhicule terrestre — ou sur un phare exposé au vent — s'exerceront donc des efforts dont il faudra tenir compte, soit, dans le cas du véhicule, pour vaincre la résistance à l'avancement qui en résulte soit, dans le cas du phare, pour le calcul de la structure. Cette force devient rapidement importante, car elle croît avec le carré de la vitesse du « vent relatif » (vitesse du fluide par rapport au solide) : $F = \frac{1}{2} \rho S C v^2$, où v : vitesse du vent relatif ; ρ : masse volumique du gaz ; S : surface du maître-couple (projection du solide sur un plan perpendiculaire à la vitesse).

C est un coefficient de forme : il dépend de la forme du solide ; un disque circulaire n'a pas la même résistance aérodynamique qu'un solide en « goutte d'eau » de même maître-couple :



C'est la raison du « carénage ♦ » aérodynamique des voitures modernes. Sur une aile d'avion, on considère les composantes verticale R_Z (portance) et horizontale R_X (traînée) de la résistance aérodynamique, R_Z étant dirigée vers le haut lorsque l'aile fait un angle α avec la direction du vent ♦.

♦ On appelle carénage l'opération donnant (en gros) au corps la forme d'une coque de bateau (carène) : les lois de la mécanique des fluides sont les mêmes dans les deux cas.

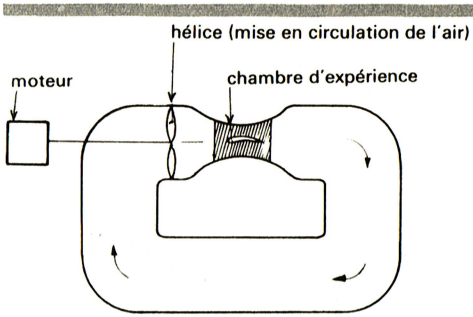
♦ Voir également Traînée, Portance, Profil.

Dans ce cas : $R_x = \frac{1}{2} \rho S v^2 C_x$ $R_z = \frac{1}{2} \rho S v^2 C_z$

S est ici la surface de l'aile, C_x et C_z des coefficients qui dépendent du profil de l'aile et de l'angle α d'incidence avec le vent. On doit donc rechercher les formes d'ailes qui donnent les C_z les meilleurs avec le C_x le plus faible possible.

Les souffleries

Les moyens d'étude de l'aérodynamique sont essentiellement les souffleries. Une soufflerie est une installation souvent gigantesque où l'on crée un courant d'air de vitesse bien définie dans une chambre d'expériences où l'on place les maquettes, éléments d'avions ou avions entiers, reliés à des appareils de mesure permettant d'enregistrer les forces mises en jeu.



La première soufflerie fut construite par Gustave Eiffel en 1913. La plus importante soufflerie française est celle d'Aussois (près de Modane) où une puissance de l'ordre de 100 000 kilowatts permet d'atteindre des vitesses de l'ordre de 2 fois celle du son dans une zone d'expérience de plusieurs mètres carrés de section.

Jusqu'en 1944, les véhicules aériens avaient atteint des vitesses de l'ordre de 500 à 600 km/h, et l'on pouvait considérer l'air comme incompressible. Au-delà, les phénomènes dus à la compressibilité de l'air remirent en question tous les résultats acquis, et de nombreux pilotes payèrent de leur vie la conquête du « mur du son » (la vitesse de l'appareil est égale à celle du son dans l'air qui l'entoure).

Les études systématiques en soufflerie ont permis de maîtriser ces problèmes. Actuellement le problème réside dans l'échauffement des appareils en vol supersonique.

AIMANTATION ♦ (Magnetization) pages 26, 100, 184, 190, 192, 199, 202, 203, 207, 260, 306 à 307, 308, 333, 334, 339, 356, 357, 412, 478.

♦ Se reporter à l'article : l'Électricité et le magnétisme, pages 199 à 203.

Phénomène au cours duquel une substance, placée dans un champ magnétique, acquiert des propriétés qui lui permettent de s'orienter sous l'action de ce champ, comme le fait l'aiguille aimantée.

Suivant la façon dont s'aimantent les substances, on peut les classer en :

— paramagnétiques, qui s'aimantent faiblement dans le sens du champ ;

— diamagnétiques, qui s'aimantent faiblement en sens inverse du champ ;

— ferromagnétiques, dont l'aimantation est importante dans le sens du champ et d'intensité variable avec celle du champ.

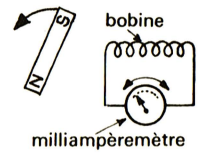
L'étude de ces 3 catégories, et du passage de l'état ferromagnétique à l'état paramagnétique, remonte à Pierre Curie qui en fit l'objet de sa thèse.

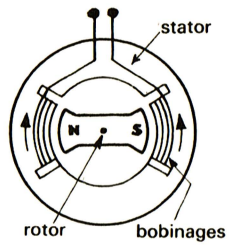
Les progrès dans l'étude de l'aimantation ont été la conséquence d'un approfondissement de la connaissance de la structure électronique. Les effets magnétiques sont liés au spin des électrons ♦ et à leur nombre, et l'étude de ces effets dans le cadre de la mécanique quantique permit non seulement de rendre compte des différences entre les substances paramagnétiques, diamagnétiques et ferromagnétiques, mais encore de prévoir l'existence de substances dites antiferromagnétiques et ferrimagnétiques (travaux de Lev Davidovitch Landau et Louis Néel, entre autres), existence confirmée par l'expérience.

♦ Voir l'article : la physique des hautes énergies : les Particules, page 415.

ALTERNATEURS (Alternator) pages 180, 192, 273, 308, 348, 410.

Générateurs de courant électrique alternatif, par utilisation du phénomène d'induction électromagnétique.
Lorsqu'on fait tourner un aimant devant une bobine fixe, on observe aux bornes de celle-ci une tension variant périodiquement entre deux valeurs symétriques, c'est-à-dire une tension alternative.
Les alternateurs industriels utilisent ce principe.
On trouvera donc :
— une partie mobile (ou rotor) entraînée par une turbine et constituée par un électro-aimant ;
— une partie fixe (ou stator) constituée par une carcasse magnétique sur laquelle sont fixés des enroulements, aux bornes desquels on recueille la tension alternative.
Ce système est intéressant, car il permet de n'avoir aucun contact tournant limitant la puissance réalisable. Nous venons de décrire l'alternateur le plus simple.
En fait, on place 3 paires de bobines qui permettent d'obtenir 3 courants « triphasés » dont l'intérêt technique est important : toute l'énergie produite par l'E.D.F. provient d'alternateurs, entraînés par des turbines hydrauliques ou à vapeur.
Les puissances obtenues sont très considérables : deux exemples le montrent. La centrale hydroélectrique du mont Cenis comporte 2 alternateurs de 200 000 kVA. La centrale thermique de Vaires-sur-Seine comporte 2 groupes de 500 000 kVA ♦.





♦ 1 VA = 1 volt ampère, correspond à une puissance effective maximale de 1 watt.

ALTERNATIF (Courant) voir Courant électrique et les pages 231, 234.

AMPÈRE (André-Marie) pages 102, 192, 193, 200, 205, 357.

Né en 1775 à Lyon. Après une jeunesse assombrie par la mort de son père, victime de la Terreur, Ampère s'impose d'abord comme un brillant mathématicien. Il est inspecteur général de l'Université en 1808, professeur d'analyse mathématique à l'École polytechnique en 1809, membre de l'Académie des sciences en 1814 ; mais, dès cette époque, il s'intéresse aux autres domaines de la connaissance : la théorie des gaz et la chimie l'amènent à énoncer, en même temps qu'Avogadro, la loi qui porte le nom d'Avogadro-Ampère.
Cet esprit curieux, qui lisait les auteurs latins dans le texte et professa un cours de logique, ne devait pas manquer de s'intéresser à la physique.
A quarante-cinq ans, il prend connaissance de l'expérience d'Œrsted et, en quelques semaines, établit une théorie de l'électromagnétisme. Son hypothèse de l'équivalence des aimants et des courants est à la base des théories du magnétisme.

André-Marie Ampère (Viollet).

Ses connaissances mathématiques l'aident à établir la formulation des lois de l'électromagnétisme, sous une forme qui est encore valable.
Ampère n'était pas seulement un théoricien, mais un expérimentateur qui ne perdait pas de vue les applications : il avait prévu le télégraphe électrique, et on lui doit l'invention de l'électro-aimant... Ses multiples activités finirent par avoir raison de sa santé. Il meurt en 1836 à Marseille, au cours d'une tournée d'inspection.

AMPÈRE (Ampere) pages 310, 316, 358, 528.

L'ampère (A) est l'unité légale d'intensité d'un courant électrique. Elle correspond au passage dans un circuit de 1 coulomb par seconde. Pour reprendre les termes de la définition légale : « l'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés dans le vide à une distance de 1 m l'un de l'autre, produirait entre ces 2 conducteurs une force égale à 2.10^{-7} newton par mètre de longueur » (décret du 3 mai 1961).

AMPLITUDE (Amplitude) : voir Vibratoire (phénomène) et les pages 216 à 218, 219, 220, 221, 225, 227, 309, 311, 385, 486, 497.

ANALYSE (Analysis) pages 128, 508.

Suite d'opérations conduisant à la séparation des constituants d'une substance, ou plus généralement étude des facteurs intervenant dans un phénomène.
Dans le sens habituel d'analyse chimique, on se propose d'abord d'isoler les corps purs (ou espèces chimiques) d'un mélange (analyse immédiate), puis de rechercher les constituants de chacun des corps purs et de les doser (analyse élémentaire).

Analyse immédiate

Les méthodes employées sont très diverses. L'analyse immédiate utilise de plus en plus, à côté des opérations classiques de distillation, de cristallisation, des procédés tels que la chromatographie, ou fixation sélective sur des supports tels que l'alumine ou le papier, des substances préalablement dissoutes dans un solvant convenable.

Analyse élémentaire

L'analyse élémentaire, d'ailleurs très différente suivant qu'on opère sur une substance organique ou minérale, a longtemps utilisé des méthodes purement chimiques (action sur des réactifs appropriés). Elle utilise maintenant des méthodes physiques, en particulier la spectrographie, aussi bien que les méthodes chimiques traditionnelles.

Les progrès de l'analyse ont porté non seulement sur les méthodes, mais encore sur la précision de celles-ci : ainsi, la microanalyse permet d'identifier des substances à partir d'échantillons de quelques milligrammes, et parfois moins.

ANDERSON (Carl) pages 103, 178, 294, 482.

Physicien américain, né à New York en 1905.
Encore jeune, Anderson entreprend une série d'études sur les rayons cosmiques qui l'amènent à prendre part à des ascensions stratosphériques. En 1932, il découvre

le positron ou électron positif, ce qui lui vaut le prix Nobel de physique en 1936. Poursuivant ses recherches, en particulier sur les chambres de Wilson employées avec des champs magnétiques intenses, il contribue à mettre en évidence l'existence de mésons ♦ dans le rayonnement cosmique. Nommé professeur de physique au California Institute of Technology en 1939, il est actuellement considéré comme l'un des plus éminents chercheurs en matière des nouvelles particules du rayonnement cosmique.

♦ Voir l'article : les Particules, pages 421 à 425, 435 à 437.

Ouvrage essentiel :
The Production and Properties of Positrons (Imp. Royale, Stockholm, 1936).

ANNIHILATION (Annihilation) pages 29, 46, 173.

Phénomène au cours duquel il y a disparition de matière, avec production corrélative d'énergie, conformément à la relation d'Einstein ♦. D'une façon générale, il peut se produire une annihilation lorsqu'une particule rencontre l'antiparticule correspondante.

♦ $E = mc^2$

Ainsi, lorsqu'un positron (électron positif) rencontre un négaton (électron négatif, dont le positron est l'antiparticule), les deux particules disparaissent avec l'émission d'un rayonnement γ (photon de haute énergie), phénomène observé dès 1933 par André Thibaud et Frédéric Joliot-Curie.

L'annihilation peut être incomplète : la rencontre d'un proton et d'un antiproton produit, outre un photon γ, des mésons π (pions) dont la masse n'est pas nulle ♦.

♦ Voir l'article : la physique des hautes énergies : les Particules, pages 428 et 429.

ANODE (Anode, Anelectrode) pages 204, 238, 258.

Du grec « ana » = en remontant, et « hodos » = chemin. L'anode est l'électrode d'un appareil reliée au pôle positif d'un générateur électrique (donc l'électrode qu'on trouvera en « remontant » le courant, qui va du pôle + au pôle — à l'extérieur du générateur).

Dans un dispositif électronique (tube de radio, etc.), l'anode désigne une électrode portée à une tension positive par rapport à la source d'électrons et qui attire ceux-ci.

ANTENNE (Aerial, Radar scanner) pages 213, 224, 247, 260, 336, 486, 524.

Dispositif assurant l'émission ou la réception d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde variant du décimètre au kilomètre (approximativement).

A la réception, le champ électromagnétique, dû à l'émetteur, produit dans l'antenne une tension qui est appliquée au récepteur. Suivant la forme de l'antenne, c'est la composante électrique (antennes linéaires) ou la composante magnétique (antennes en boucle ou cadres) du champ électromagnétique qui agit sur celle-ci. Des groupements d'antennes, et le calcul convenable des éléments, permettent d'obtenir des effets directifs c'est-à-dire de recevoir les signaux provenant d'une direction bien déterminée (goniométrie ♦ , radar...).

♦ Goniométrie : technique de repérage de la position d'un avion ou d'un bateau par la recherche de la direction dans laquelle un poste récepteur au sol perçoit ses émissions, ou de la direction dans laquelle on perçoit, de l'avion, l'émission du poste au sol.

De même, l'antenne émettrice est un « radiateur » d'énergie dont le rôle est de transmettre dans une portion plus ou moins étendue de l'espace, sous forme d'ondes électromagnétiques, l'énergie fournie par l'émetteur. Plus que pour un récepteur, il est nécessaire d'étudier soigneusement les dimensions des éléments, de façon à assurer une bonne réception sur une étendue plus ou moins grande ♦.

♦ Voir l'article : l'Électronique, page 224.

ANTIFERROMAGNÉTISME ♦ (Antiferromagnetism) pages 203, 260.

♦ Se reporter à l'article : l'Électricité et le magnétisme, page 202.

Alors que dans une substance ferromagnétique les moments magnétiques dus au spin des électrons s'orientent tous dans le même sens, dans le cas de l'antiferromagnétisme la moitié de ces moments est orientée dans un sens, et l'autre moitié en sens opposé, et comme ces moments sont de même grandeur, le résultat global est nul. Comme le ferromagnétisme, l'antiferromagnétisme est un état ordonné qui cesse à une température caractérisant la substance. Ce « point de Néel » est analogue au point de Curie des ferromagnétiques ♦.

♦ Voir Ferromagnétisme.

Ce phénomène qu'on pouvait prévoir d'après la théorie quantique du magnétisme (Heisenberg) a été étudié par Louis Néel (1932) et par Lev Davidovitch Landau (1933). Sa mise en évidence expérimentale par Néel a confirmé brillamment les théories modernes du magnétisme.

ANTIMATIÈRE - ANTIPARTICULE ♦ (Antiparticle) pages 28, 46, 103, 172, 176, 294 à 297, 205, 275, 326, 351, 353, 356, 413, 428, 435, 484.

♦ Se reporter à l'article : les Particules, pages 428 et 429.

Conformément à la théorie de Dirac ♦, confirmée par l'existence du positron et la découverte de l'antiproton, particule de masse égale à celle du proton mais de charge négative (1955), on admet qu'à chaque particule correspond une antiparticule, de même masse et de même spin mais dont certains nombres caractéristiques sont opposés :

♦ Voir l'article : Historique, page 294.

— charge ;
— nombre baryonique ;
— étrangeté ♦ ;
— nombre leptonique.

♦ Voir page 142.

Ainsi, pour l'électron et le positron, première antiparticule découverte (1932), nous avons :

	électron	*positron*
charge	—	+
nombre baryonique	0	0
nombre leptonique	— 1	+ 1
étrangeté	0	0

La caractéristique du couple particule-antiparticule est la possibilité d'annihilation. L'antimatière serait une matière constituée uniquement d'antiparticules : on pourrait imaginer l'antihydrogène composé d'atomes formés d'un antiproton et d'un positron. Jusqu'à présent, on n'a pas créé d'antimatière, mais seulement des antiparticules, d'abord par action des rayons cosmiques, puis avec l'aide des grands accélérateurs.

Il n'est pas exclu qu'une particule soit à elle-même son antiparticule. C'est le cas du photon, dont tous les nombres quantiques sont nuls. C'est aussi, pour la même raison, le cas du méson π^0.

ARC-EN-CIEL (Rainbow) page 352.

Phénomène lumineux produit par la réfraction des rayons solaires sur les gouttelettes d'eau en suspension dans l'atmosphère. Ce qu'on observe est dû aux rayons qui, pénétrant dans la goutte, sont partiellement et surtout sélectivement réfléchis suivant leur couleur, avant d'en ressortir. Ce qui explique les couleurs de l'arc-en-ciel, dues à la dispersion de la lumière; cela explique également que seuls les individus placés entre « le soleil et la pluie » peuvent observer un arc-en-ciel.

ARCHIMÈDE pages 264, 270, 344, 509.

(Viollet).
Archimède

Né à Syracuse en 287 av. J.-C., mort en 212 av. J.-C.
Le plus grand des mathématiciens et des physiciens de l'Antiquité fut longtemps et reste encore une figure légendaire.
Dans sa jeunesse, il fait un séjour à Alexandrie ou, sous la direction de Conon de Samos, il assimile l'œuvre d'Euclide ; puis il se fixe dans sa ville natale où il alterne recherches en mathématiques théoriques et inventions mécaniques. Lorsqu'il meurt, tué par un soldat romain à l'issue du siège de Syracuse, il est célèbre dans tout le monde antique.
De la « clochée », sorte de vis qui permet de soulever les eaux d'un fleuve, aux machines de guerre qui, pendant trois ans, tiennent en échec les assiégeants de Syracuse, les inventions ingénieuses ne cessent de naître de son esprit fertile. Dans le domaine scientifique, outre de nombreuses découvertes mathématiques, on lui doit les lois de la statique des solides et les premiers principes de l'hydrostatique.
L'invention du principe du poids spécifique, qui porte son nom, a donné naissance à une pittoresque anecdote, qu'elle soit légendaire ou véridique : Hiéron, tyran de Syracuse, soupçonnant son orfèvre, demande à Archimède de déterminer l'éventuel alliage composant la couronne. C'est dans son bain que le savant, notant soudain l'allègement progressif de son propre poids à mesure qu'il s'enfonce dans l'eau, trouve la solution. Jaillissant de l'eau, il s'élance, nu, dans les rues de Syracuse, en criant : « Euréka ! Euréka ! » (« J'ai trouvé ! J'ai trouvé ! ») Parmi ses œuvres, citons « Des corps flottants », « Sur l'équilibre des surfaces planes », « Sur les balances » ♦...

♦ *Œuvres complètes* (Desclées, Paris, 1921)

ARCHIMÈDE (Théorème d') (Archimede's principle)

Faussement appelé principe d'Archimède.
Un fluide (liquide ou gaz), ou un système de fluides baignant complètement un corps, exerce sur celui-ci des forces de pression dont la résultante est une force unique :
— verticale,
— dirigée de bas en haut,
— appliquée au centre de gravité du système de fluides déplacé par le corps,
— d'intensité égale au poids des fluides déplacés.
Nul n'ignore les conséquences pratiques de ce théorème : perte apparente de poids d'un corps plongé dans l'eau, corps flottants, aérostats..., mais rares sont ceux qui pensent que, réciproquement, le corps plongé dans le fluide exerce sur celui-ci la même force dirigée vers le bas, conformément au principe d'action et de réaction.

ARRHENIUS (Svante) pages 23, 81, 88, 125, 137.

Physicien et chimiste suédois, né près d'Uppsala en 1859, mort à Stockholm en 1927.
Jeune enfant, Arrhenius se révèle déjà extrêmement doué pour tout ce qui a trait au calcul et aux mathématiques. A l'issue d'études universitaires de physique, il présente une thèse de doctorat sur la conductibilité des électrolytes ; il n'est reçu que de justesse, l'essence révolutionnaire de sa théorie étant totalement méconnue. Après un séjour dans des universités allemandes, Arrhenius s'installe définitivement

à Stockholm ou, devenu célèbre, il cumule les fonctions de professeur de physique et de recteur à l'université, puis de directeur de l'Institut Nobel. Il reçoit le prix Nobel de chimie en 1903.
Poursuivant ses recherches dans la voie qu'il a tracée dès sa thèse de doctorat, Arrhenius énonce à vingt-sept ans la théorie de l'ionisation des électrolytes, d'où est tirée l'explication des lois physiques de l'électrolyse. Il développe ensuite la célèbre théorie des ions, permettant d'élucider les propriétés chimiques des électrolytes. Cet esprit étonnament curieux se penche alors sur d'autres problèmes, dont la chimie organique et la biochimie. Toutefois, c'est dans le domaine de la cosmogonie et de l'astronomie qu'il laisse également une empreinte considérable, avançant notamment l'hypothèse de la panspermie ♦.
Si, à la fin de sa vie, Arrhenius se voit comblé d'honneurs et de distinctions, il ne se départira jamais d'un remarquable humour joint à une largesse de cœur qui en font l'un des hommes les plus appréciés de son temps.

♦ Panspermie : transmission de la vie dans les espaces interstellaires par des minuscules germes.

Ouvrages essentiels :
L'Évolution des Mondes (C. Béranger, Paris, 1910).
Conférences sur quelques thèmes choisis de la chimie physique pure et appliquée (Hermann, Paris, 1912).
Le Destin des étoiles, *Études d'astronomie physique* (Alcan, Paris, 1921).

ASSERVISSEMENT voir l'article : l'Électronique, page 223.

ASTON (Francis William) pages 499, 508, 518.

Physicien anglais, né à Birmingham en 1877, mort à Cambridge en 1945. Étudiant puis professeur aux universités de Birmingham et de Cambridge, Aston délaisse bientôt ses études de chimie pour se consacrer entièrement à des recherches en physique. Sous l'égide de J. J. Thomson, il étudie les décharges électriques dans les gaz raréfiés. Au cours d'expériences sur le néon, il met en évidence des isotopes. Cette découverte va dès lors orienter toute sa vie et le promouvoir au rang des grands savants de son époque.
Après la Première Guerre mondiale, il retourne à ses laboratoires et, cherchant à séparer les isotopes, invente en 1920 le spectrographe de masse. Ce dispositif lui permet de prouver que le néon est un mélange d'isotopes et qu'il en est de même pour d'autres éléments, dont le chlore. Deux autres découvertes sont à l'actif d'Aston : d'une part, le calcul des poids atomiques chimiques d'après les masses et les volumes des isotopes déterminés physiquement, et cela grâce à sa formation de chimiste, et, d'autre part, l'énoncé de la règle des nombres entiers : en considérant 16 comme poids atomique de l'oxygène, tous les autres corps simples ont pour poids atomique des nombres entiers. Son apport considérable à la science est rapidement reconnu. De nombreuses distinctions lui sont décernées à travers le monde, dont le prix Nobel de chimie en 1922.

Ouvrages essentiels :
Les Isotopes (J. Hermann, Paris, 1923) ;
Mass spectra and Isotopes (Arnold, Londres, 1942).

ATOME (Atom) voir l'article pages suivantes et les pages 83, 104 à 133, 141, 146 à 166, 177, 283, 288, 195, 197, 200, 205, 236, 250, 253, 256, 260, 263, 276, 277, 312, 318, 321, 324, 326, 332, 337, 339, 344, 347, 353, 354, 355, 356, 409, 414, 417, 430, 432, 440, 444, 447, 449, 453, 481, 484, 485, 490, 499, 501, 504, 507, 518, 525, 528, 529, 531.

L'atome

par Patrick Golicki

Patrick Golicki, né le 6 février 1938 à Paris, ingénieur E.T.A.C.A., auditeur au Génie atomique.

L'atome est souvent défini comme le plus petit élément de matière ne subissant pas de modification au cours d'une réaction chimique. C'est la plus petite partie caractéristique d'un corps chimique. Autrement dit, si on divise en deux un fragment de corps simple, on obtient deux fragments de la matière initiale. Si on divise de nouveau un de ces fragments en deux, on obtient de nouveau deux fragments, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'on obtienne non plus des fragments de la matière initiale, mais des éléments (des nucléons et des électrons) très différents du corps ayant subi les divisions successives. La dernière opération effectuée consiste à diviser l'atome en deux. Si on s'était abstenu de cette ultime division, on aurait eu devant soi l'atome du corps initial.
Avant la découverte de la radioactivité, au début du siècle, l'atome était tenu pour indivisible.
Les molécules sont des groupements d'atomes. Les corps composés sont constitués de molécules renfermant des atomes de chacun des corps simples constituant le corps composé.

HISTORIQUE

Les philosophes de la Grèce ancienne formulèrent au Ve siècle avant J.-C. les premières hypothèses sur les structures de la matière. On attribue à Anaxarque, Empédocle, Leucippe et Démocrite la notion de particules indivisibles très légères, invisibles et incompressibles, qu'ils appelèrent atomes. Cette conception de la structure de la matière est connue aujourd'hui grâce aux œuvres du poète latin Lucrèce, principalement par son poème « De la nature des choses » : « Chaque être subsiste jusqu'à l'instant où il reçoit un choc égal à la puissance qui unit ses principes. Rien ne s'anéantit et la destruction ne produit que la séparation des éléments [...]. Les corps

ne sont pas anéantis [...]. De leurs débris, la nature forme de nouveaux êtres [...]. Les corps, ce sont, d'une part, les principes simples des choses, les atomes, et, d'autre part, les composés formés par ces éléments premiers. ♦ »

♦ Lucrèce (98-53 av. J.-C.) : *De natura rerum.*

En 1811, Avogadro fit la distinction entre atomes et molécules et remarqua la constance du nombre de molécules contenues dans des volumes égaux de différents gaz à pression et à température égales. Ce nombre (nombre d'Avogadro) est de $6{,}02 . 10^{23}$.

Prout exposa en 1815 que tous les atomes étaient formés d'atomes d'hydrogène. La loi des « proportions définies ♦ » énonce que les masses des éléments d'un composé chimique sont dans un rapport constant.

♦ Loi des proportions définies ou loi de Prout.

La loi des « proportions multiples ♦ » exprime que, si deux éléments sont capables d'entrer en réaction et de former plusieurs composés, les masses d'un de ces éléments qui se combinent à une même masse de l'autre élément sont dans des rapports simples égaux à des fractions rationnelles.

♦ Loi des proportions multiples ou loi de Dalton.

L'hypothèse de Prout, selon laquelle l'hydrogène était l'unité de base de la structure atomique, fut réfutée par les premières mesures précises des masses atomiques.

La fin du XIXe siècle marqua l'entrée de la physique atomique dans sa phase « moderne ». C'est à cette époque que Röntgen découvrit les rayons X (1895), Becquerel la radioactivité (1896), Thomson l'électron (1897). Ce dernier montra que tous les atomes contenaient des électrons et que la masse de l'électron était du 10^{-27} g environ. Les travaux de Faraday, de Thomson et de Wilson permirent de constater que la masse de l'atome d'hydrogène était près de 1 800 fois supérieure à celle de l'électron. Bohr et Thomson établirent que le nombre d'électrons par atome était à peu près égal à la moitié de la masse atomique. Lorentz et Thomson considérèrent, quant à eux, les électrons comme des composants de l'atome. La notion d'indivisibilité de l'atome commença donc à s'estomper dès la fin du XIXe siècle.

Thomson émit l'un des premiers « modèles de l'atome » dans lequel les électrons répartis uniformément et chargés négativement se trouvaient noyés dans une sphère chargée positivement, dont les dimensions ($\simeq 10^{-8}$ cm de diamètre) correspondaient à l'écartement des atomes dans les états les plus condensés de la matière (solide ou liquide). L'atome était électriquement neutre, et les électrons étaient animés d'un mouvement vibratoire.

Ce modèle ne permettait pas d'expliquer certains phénomènes observés, notamment la déviation angulaire de quelques particules α lors de leur passage à travers une feuille d'or. Le modèle de Thomson ne pouvait prévoir que des angles de déflexion modérés par diffusion simple et une probalité très faible de grande déflexion par diffusion

multiple. Or une particule α sur 8 000 était défléchie d'un angle supérieur à 90°.
Rutherford proposa que la charge positive ainsi que la presque totalité de la masse de l'atome qui lui est associée soit concentrée dans un noyau très petit (10^{-12} cm de diamètre environ, soit 10^{-4} de moins que l'atome de Thomson) et que les électrons soient répartis dans le reste du volume alloué à l'atome.

Avec Bohr et Rutherford disparaît l'atome, unité indivisible

La théorie de Rutherford était en accord avec les expériences de Geiger et de Marsden sur la déviation des particules α qui avaient montré que les charges positives de l'atome ne pouvaient être présentes dans tout le volume atomique, mais seulement dans un espace (le « noyau ») plus petit (10^{-12} cm). Cette théorie ne précisait pas le signe de la charge du noyau et ce n'est que par la masse de l'électron et les expériences sur les spectres des rayons X qu'on put déterminer la charge du noyau ; celle-ci devait être positive.
Le modèle atomique de Rutherford comportait donc :
— un noyau d'un diamètre de 10^{-12} cm où était concentrée la presque totalité de la masse de l'atome chargé positivement ;
— une distribution d'électrons chargés négativement (les électrons ne sont pas répartis au hasard, mais sont situés sur des « orbites », un peu comme les planètes gravitant autour du Soleil ; nous verrons plus loin les lois élémentaires qui régissent les mouvements des électrons sur les différentes orbites).
La charge totale de l'atome était donc nulle et son diamètre de l'ordre de 10^{-8} cm. L'atome se trouvait ainsi pratiquement « vide ».
Ce modèle identifiait la structure de l'atome à un système solaire où le noyau jouerait le rôle du Soleil et les électrons celui des planètes.
Il détruisit l'ancien concept de l'atome, unité indivisible de la matière.
Les travaux de Geiger et Marsden en accord avec les expériences de Barkla et les travaux de Moseley montrèrent que « le nombre des particules élémentaires composant le centre de l'atome est égal à la moitié de la masse atomique ».
Le modèle de Rutherford se heurtait cependant à une difficulté : si les électrons se comportaient comme des planètes autour du Soleil, leurs mouvements devaient obéir aux lois de la mécanique et de l'électrodynamique classiques ; les électrons devaient alors émettre un rayonnement continu, à cause de leur accélération centripète. Or un tel rayonnement n'avait jamais été observé en spectrographie.
Bohr leva la difficulté en introduisant les concepts de la mécanique quantique et de la mécanique relativiste d'Einstein.
Il énonça ainsi les deux postulats suivants :
1. « Les trajectoires possibles de l'électron dans l'atome d'hydrogène sont celles dont le moment angulaire est un multiple entier de la constante de Planck divisée par 2π $\left(\hbar = \frac{h}{2\pi}\right)$. »

2. « L'émission (ou l'absorption) de radiation est déterminée par le passage de l'électron d'une orbite d'énergie E_p à une autre orbite d'énergie E_q. » Autrement dit, quand un électron décrit une orbite stationnaire, l'atome n'émet ni n'absorbe de rayonnement.
Ainsi l'atome de Bohr-Rutherford lève les dernières difficultés et est considéré aujourd'hui comme le modèle quasi-définitif en attribuant en plus au noyau un moment augulaire, un moment magnétique dipolaire et un moment électrique quadripolaire ♦.

♦ Voir Moment.

L'ATOME DE BOHR-RUTHERFORD

Il est aisé d'admettre que l'atome est formé superficiellement d'une pulpe électronique légère entourant un noyau très dense [10^{14} g/cm^3]. Dans cette pulpe gravitent par exemple Z électrons négatifs, tandis que le noyau comporte Z charges électriques positives. L'ensemble électrons-noyau a une charge électrique globale nulle. Le rayon global de l'atome, supposé sphérique, est de 10^{-8} cm et celui du noyau de 10^{-12} cm.
On doit éviter de trop rapprocher le modèle de l'atome de celui d'un système solaire, car la mécanique ondulatoire interdit d'envisager les trajectoires des électrons comme des orbites à l'image de celles qu'étudie la mécanique céleste ; on aura seulement le droit de parler de valeurs, en chaque point de l'espace, de la probabilité de présence d'un électron.
La physique nucléaire consiste essentiellement en l'étude du noyau atomique. Mais, avant d'entreprendre cette étude, il est bon d'examiner rapidement les lois élémentaires de la mécanique relativiste, de la mécanique quantique et de la mécanique ondulatoire qui régissent les mouvements des particules contenues dans l'atome.

La relativité

Selon la mécanique classique, un mobile peut être animé d'une vitesse quelconque ; si on applique pendant une durée prolongée une force F sur un solide, celui-ci peut prendre une vitesse illimitée. La formule de Newton, base de la mécanique classique, donne la relation qui existe entre la force (F), la masse (m) et l'accélération (γ): $F = m\,\gamma$.
Selon la théorie de la relativité, due à Einstein, il existe une vitesse limite c qu'aucun corps physique ne peut atteindre et qu'aucune propagation d'énergie ne peut dépasser. Cette vitesse limite est la célérité de la lumière dans le vide : 299 790 km/s, soit pratiquement 3.10^8 m/s.
Cette vitesse limite ne se présente pas comme un mur à la gauche duquel la mécanique classique serait juste, et à la droite duquel elle serait fausse.

En fait, il faut appliquer d'une manière continue les corrections relativistes ♦, mais, pour des vitesses très inférieures à celle de la lumière, ces corrections sont si faibles qu'on peut les négliger. Cependant, puisqu'à une force constante ne peut plus correspondre une accélération constante, c'est-à-dire une dérivée ♦ constante de la vitesse, il faut admettre que la masse d'un corps en mouvement n'est pas indépendante de sa vitesse.

♦ Dès que la vitesse du mobile étudié (particule, par exemple) n'est plus petite devant la vitesse de la lumière c, la notion classique de la masse doit être reconsidérée. On ne peut plus la considérer comme une constante, mais on doit lui attribuer une variation en fonction de la vitesse.

La loi de variation de la masse en fonction de la vitesse est donnée par la formule suivante : $m = \dfrac{m_o}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$, où m est la masse au repos (à vitesse nulle), v la vitesse du mobile, c la célérité de la lumière.

♦ Voir Aperçu mathématique page 16.

On voit que si v tend vers c, $\dfrac{v^2}{c^2} \longrightarrow 1$, donc $\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}} = \sqrt{1 - 1} = 0$.

Et $m = \dfrac{m_o}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$ devient $m = \dfrac{m_o}{0} = \infty$, ce qui est impossible, car cela signifierait, par exemple, qu'un électron posséderait la même masse que... l'univers. Autrement dit, jamais un mobile ne pourra atteindre la vitesse c de la lumière.

La masse n'est pas seule à varier avec la vitesse : toute longueur liée au mobile et parallèle à la direction du mouvement apparaît, à un observateur fixe, contractée dans le rapport $\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}$, appelé facteur de contraction de Lorentz.

Les mesures de durées sont au contraire dilatées dans la même proportion.

La formule de Newton $F = m\gamma$ peut se mettre sous la forme : $F = \dfrac{d}{dt}(mv)$ ♦ ; elle est encore valable pour les vitesses proches de celles de la lumière si on tient compte de la loi de variation de la masse.

♦ L'opérateur $\dfrac{d}{dt}$ signifie « dérivée par rapport au temps ».

Si v est beaucoup plus petit que c (domaine de la mécanique classique), on retrouve la formule classique qui est $T = \dfrac{1}{2} m_o v^2$ ♦.

♦ T : énergie cinétique.

Si v tend vers c, E augmente indéfiniment.

Pour des raisons qui sortent du cadre de cet exposé, on est amené à poser que $E = mc^2$ et, pour un corps au repos, $E_o = m_o c^2$, où E représente donc l'équivalent en énergie de la masse m (E_o représente l'équivalent de m_o, c'est-à-dire la masse au repos ($v = 0$) ; c'est l'« énergie propre »).

Cette énergie contenue dans la masse au repos est considérable puisqu'elle est de 25 000 000 kWh par gramme de matière. A toute

énergie correspond donc une masse. L'énergie contenue dans la matière au repos ne dépend pas de la nature de la matière : c'est une propriété intrinsèque de la matière.

La mécanique quantique

En mécanique classique, on peut toujours agir sur un système pour lui faire gagner ou perdre des quantités d'énergies aussi petites que l'on veut.

Ainsi, une corde vibrante ne peut osciller qu'à des fréquences discrètes ♦ (régime fondamental ♦ ou un de ces harmoniques), mais l'amplitude de cette vibration peut varier d'une manière continue. Lorsqu'un atome, un noyau sont dans un état interne bien défini caractérisé par un niveau d'énergie, ils ne peuvent ni gagner ni perdre d'énergie sous forme de rayonnement. Cela conformément au principe de la thermodynamique qui indique que l'énergie d'un système est invariable tant que le système est isolé. Mais le noyau peut passer d'un état d'équilibre dynamique, caractérisé par un niveau d'énergie W, à un autre état d'équilibre, d'énergie W′, en absorbant ou en dégageant la différence d'énergie W — W′ ; cette quantité d'énergie constitue un « grain » d'énergie appelé « quantum ». Si cette variation d'énergie se réalise par absorption ou émission d'une radiation, la fréquence de celle-ci est donnée par: $W - W' = h\nu$ ♦.

Comme la fréquence varie en raison inverse de la longueur d'onde, l'énergie par quantum va croissant lorsqu'on passe des ondes radio-électriques aux rayons X et γ ♦. Einstein va plus loin que Planck puisqu'il admet que la propagation elle-même des ondes électromagnétiques se fait par quantas discrets d'énergie (photons) indépendamment de l'acte d'émission ou d'absorption.

Cette théorie permet d'interpréter les interactions entre photons et électrons telles qu'elles se manifestent dans l'effet photoélectrique. Par exemple, un photon de lumière visible est absorbé par une surface métallique et un électron est éjecté. La vitesse du photon ne dépend que de la couleur (fréquence) de la lumière ♦. La relation entre l'énergie du photon incident et celle de l'électron arraché est donnée par la relation d'Einstein :

$h\nu = \tau + \frac{mv^2}{2}$, où $h\nu$ = énergie du photon incident, τ = énergie requise pour arracher l'électron de la surface du métal, $\frac{mv^2}{2}$ = énergie cinétique de l'électron éjecté.

♦ Discrètes : c'est-à-dire formant une suite de valeurs discontinues.

♦ Régime fondamental : c'est la fréquence la plus basse à laquelle peut vibrer la corde ; les harmoniques en sont des multiples entiers. Voir note page 216.

♦ h est la constante de Planck (= 6,62377. 10^{-27} erg/s) et ν est la fréquence de la radiation émise.

♦ Voir tableau page 362.

♦ Dans le vide, toutes les radiations, c'est-à-dire toutes les couleurs, se propagent à une même vitesse, qui est de 300 000 km/s. Dans un milieu matériel, chaque radiation a sa propre vitesse de propagation v qui est aussi la vitesse des photons correspondants.

La mécanique ondulatoire

La matière est constituée de particules élémentaires ♦ (électrons, neutrons, protons, mésons...).

♦ Voir l'article : la physique des hautes énergies: les Particules.

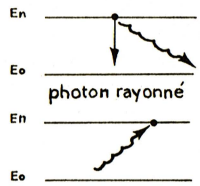
Louis de Broglie a émis l'hypothèse selon laquelle ce caractère corpusculaire est accompagné de phénomènes ondulatoires.
Cette hypothèse permit de donner une description enfin satisfaisante de la lumière, et elle a été largement confirmée depuis, grâce à l'analyse de la répartition spectrale, où l'on voit apparaître une « longueur d'onde » liée à la quantité du mouvement $P = mv$ du corpuscule par la relation : $\lambda = \frac{h}{P} = \frac{h}{mv}$.
Tous les phénomènes ondulatoires ont un caractère probabiliste. Ce double aspect corpusculaire et ondulatoire de la matière oblige à modifier les équations de la mécanique classique. Il faut introduire une nouvelle fonction : la « fonction d'onde », dont le module ♦ permet de calculer la « probabilité de présence » de la particule dans une région de l'espace donnée. Il faut donc substituer à la connaissance des trajectoires des particules habituelles en mécanique classique (trajectoires des planètes autour du Soleil, par exemple) celle de la probabilité de présence des particules dans chaque petit domaine de l'espace.
Si dv est le domaine spatial considéré et ψ la fonction d'onde, la probabilité de présence de la particule dans le domaine dv est égale à : $P = |\psi|^2\, dv$.
On peut maintenant donner une image assez précise de l'atome de Bohr-Rutherford.

♦ ψ (psi) symbolise la fonction d'onde. Cette fonction ψ peut être réelle ou complexe, c'est-à-dire comportant une partie réelle et une partie imaginaire. Tout nombre complexe x peut être mis sous la forme $x = a + bi$ (avec $i = \sqrt{-1}$). Le module de x, qu'on note $|x|$, est la quantité $|x| = \sqrt{a^2 + b^2}$, ou, en introduisant le nombre $x^* = a - bi$ (imaginaire conjugué de x), $|x| = \sqrt{x^* . x}$, puisque $(a + bi)(a - bi) = a^2 - i^2b^2 = a^2 + b^2$. Donc ici $|\psi|^2 = \psi^*\psi$.

LES ELECTRONS

Nous avons vu précédemment que les électrons entouraient le noyau, qu'ils formaient autour de lui une « pulpe » et qu'ils étaient animés de mouvements régis par les lois des mécaniques relativiste, quantique et ondulatoire.
La théorie de Bohr complète celle de Rutherford à l'aide de deux hypothèses fondamentales :
1. Les électrons ne peuvent décrire dans l'atome que certaines trajectoires, dites trajectoires stables ou « états stationnaires » caractérisés par des énergies E_0, E_1, E_2 ..., définies par des conditions quantiques qui conduisent à attacher à chaque électron plusieurs nombres entiers ou semi-entiers, dits « nombres quantiques ». Les valeurs numériques de ces nombres définissent les trajectoires en forme et en grandeur. L'électron peut passer, sous l'action d'un agent extérieur, de la trajectoire initiale à une autre. On dit que l'atome passe d'un état normal à un état excité.
Cet état correspond à un niveau énergétique différent. L'état normal correspond au niveau énergétique minimal E_0.
2. Si l'atome est excité par un phénomène physique extérieur, c'est-à-dire si son niveau d'énergie est porté à E_n ($E_n > E_0$), il peut

céder cet excès d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique en revenant à l'état E_o.



La fréquence de ce rayonnement est donnée par $h\nu = E_n - E_o$. Réciproquement, l'atome ne peut absorber que des raies spectrales pour lesquelles la quantité $h\nu$ a précisément une valeur telle qu'elle peut faire passer l'atome d'un état stationnaire à une autre état stationnaire plus élevé. Les « raies d'absorption » sont déterminées par : $E_1 - E_0 = h\nu_1$; $E_2 - E_1 = h\nu_2$, etc.

La trajectoire classique de l'électron autour du noyau est une ellipse (le cercle étant un cas particulier de l'ellipse). L'énergie potentielle de l'électron est inversement proportionnelle à la distance r du noyau. L'énergie totale de l'électron est la somme de ses énergies potentielle $\left(-\frac{e^2}{r}\right)$ et cinétique $\left(\frac{mv^2}{2}\right)$: $E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{r}$.

L'équation du mouvement est donnée par la relation : $\frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{2}$, qui exprime l'égalité de la force centrifuge et de l'attraction coulombienne ♦. D'où $E = -\frac{e^2}{2r}$, où e = charge de l'électron.

♦ Voir page 54.

Mais la théorie quantique ♦ interdit à l'électron d'avoir n'importe quelle énergie (donc n'importe quel rayon ou n'importe quelle orbite ♦).

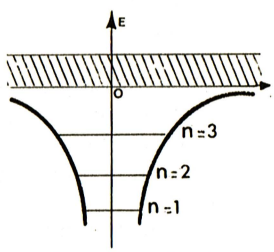
♦ Voir page 339.

L'électron ne peut prendre que certaines orbites ayant des rayons r_o, $4\,r_o$, $9\,r_o$, caractérisées par des énergies $-\frac{e^2}{2r_o}$, $-\frac{e^2}{8r_o}$, $-\frac{e^2}{18r_o}$..., pour $n = 1, 2, 3$...

♦ Dans le cas de l'hydrogène, $r_0 = 0{,}53$ A ; il est de 2,54 A pour l'aluminium et de 3,12 A pour le plomb.

Le nombre entier n détermine l'énergie de l'électron et le rayon de son orbite. Ce nombre entier est appelé « nombre quantique principal ».

La figure ci-contre représente l'évaluation du diamètre de l'orbite en fonction de ν, ainsi que celle de l'énergie de l'électron.



n = 1, n = 2, n = 3 : niveaux d'énergie quantifiés; la partie hachurée correspond aux états d'énergie.

L'hydrogène n'ayant qu'un seul électron, celui-ci se trouve normalement dans l'état $n = 1$. S'il est à niveau où $n > 1$, il est alors « excité » et, par conséquent, instable. Pour revenir à son état fondamental caractérisé par l'état d'énergie potentielle minimal ($n = 1$), il va rayonner son énergie sous la forme d'un quantum (photon) dont l'énergie, comme nous l'avons vu, est donnée par : $E_m - E_o = h\nu$.

L'atome d'hydrogène est le plus simple des atomes ; il ne possède qu'un seul électron. Tous les autres en possèdent plusieurs. Les électrons sont situés dans des « couches » plus ou moins « profondes ». La couche K est la plus profonde, c'est-à-dire la plus près du noyau : elle est caractérisée par la valeur de $n = 1$; elle correspond donc à l'électron le plus fortement lié à l'atome.

Les électrons appartenant aux couches L, M, N ont respectivement des nombres quantiques $n = 2, 3, 4$.

Le nombre d'électrons dans chaque couche est au maximum de $2n^2$ (lorsque la couche est saturée, il y a au maximum $2\,n^2$ électrons). Ainsi, il pourra y avoir au maximum, dans la couche K, $2 \times 1^2 = 2$ électrons ; dans la couche L, où $n = 2$, $2 \times 2^2 = 8$ électrons. Il existe quatre nombres quantiques différents qui caractérisent exactement l'orbite autour du noyau de chaque électron :

n = nombre quantique principal (défini ci-dessus) ;

l = quantum azimutal (ainsi appelé parce qu'il est relatif à l'orientation de l'orbite) qui peut prendre les valeurs $n - 1$, $n - 2$..., 1 et 0 ;

ml = nombre quantique magnétique (relatif au moment magnétique de l'électron) pouvant prendre $(2\,l + 1)$ valeurs : $-\,l$, $-\,(l - 1)$..., 0... $(l - 1)$, l ;

ms = spin ♦ ne pouvant prendre que deux valeurs : $+\,\frac{1}{2}$ et $-\,\frac{1}{2}$.

♦ Voir l'article : la physique des hautes énergies : les Particules, page 415.

En outre, comme nous le verrons plus loin, on peut aussi faire apparaître le nombre quantique dit interne j qui a pour valeur $l \pm S$, où S = spin de la particule qui correspond à son moment cinétique. Pour les électrons, $S = \frac{1}{2}$, d'où $j = l \pm \frac{1}{2}$.

Le principe d'exclusion de Pauli indique qu'il ne peut y avoir au sein d'un atome deux électrons ayant exactement les quatre mêmes nombres quantiques. Ce principe permet d'interpréter le tableau périodique des éléments de Mendéléïev, qui classe les éléments naturels en fonction de la périodicité de leurs propriétés physiques et chimiques. Or celles-ci sont dues presque exclusivement à la structure des couches électroniques externes. Ainsi l'hélium possède la couche K ($n = 1$) saturée par 2 électrons. Le néon comporte 10 électrons, ce qui sature les couches K ($n = 1$, d'où 2 électrons) et L ($n = 2$, d'où 8 électrons). Ces deux corps ont des propriétés semblables et se retrouvent dans la même colonne (ou même groupe) du tableau périodique de Mendéléïev ♦.

♦ Voir tableau page 42.

Dans ce tableau, les lignes horizontales indiquent la couche externe de l'atome et les colonnes le nombre d'électrons se trouvant sur cette couche à l'état fondamental. Ainsi, le calcium se trouve à la quatrième ligne horizontale puisque sa couche externe est la couche N (on compte à partir de K) ; il est placé sur la deuxième colonne car cette couche ne comporte que 2 électrons.

Le quantum azimutal l peut prendre les valeurs $l = 0, 1, 2, 3$... Ces valeurs sont remplacées, en spectrographie, par les lettres s, p, d..., caractérisant des « états » de la façon suivante :

la valeur $l = 0$ correspond à l'état s ;
$l = 1$ correspond à l'état p ;
$l = 2$ correspond à l'état d ;
$l = 3$ correspond à l'état f ;
$l = 4$ correspond à l'état g ;
$l = 5$ correspond à l'état h ;
$l = 6$ correspond à l'état i,
etc. ♦

♦ Voir Éléments de transition.

Classification périodique de Mendéléïev

En 1867, Mendéléïev découvrit la classification périodique des atomes de façon empirique, en essayant de classer les atomes par leurs propriétés chimiques et en mettant en évidence les similitudes observées expérimentalement. Mendéléïev établit un tableau dans lequel les lignes indiquent la couche externe de l'atome, et les colonnes le nombre d'électrons qui se trouvent dans la couche externe à l'état fondamental. Ainsi le chlore (Cl) se trouve sur la troisième ligne, car sa couche externe est la troisième (couche M) et sur la septième colonne, car sa couche M possède sept électrons.
Cependant, s'il est aisé de placer un certain nombre de corps sans difficulté comme l'indique le tableau simplifié ci-dessous, il est plus compliqué de classer tous les éléments.

	1	2	3	4	5	6	7	8
K	H							He
L	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
M	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	A
N	K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Xe
O	Rb	Sr	In	Sn	Sb	Te	I	Kr

En effet, les dix éléments dont les numéros atomiques vont de 21 à 30 ont tous une couche externe N comprenant deux électrons. Ils devraient donc être tous dans la même case que le calcium (Ca). On pourrait alors représenter le tableau en dressant une oblique commençant à la case Ca, comme ci-dessous.

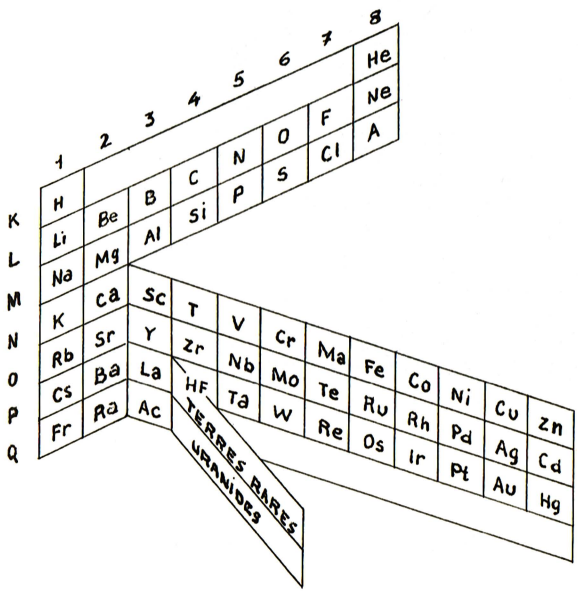


Tableau périodique de Mendéléïev

COUCHES	GROUPES / PÉRIODES	0	I		II		III		IV	
K	1		1 H hydrogène 1,0							
L	2	2 He hélium 4,0	3 Li lithium 6,9		4 Be béryllium 9,0		5 B bore 10,8		6 C carbone 12,0	
M	3	10 Ne néon 20,2	11 Na sodium 23,0		12 Mg magnésium 24,3		13 Al aluminium 27,0		14 Si silicium 28,1	
N	4	18 Ar argon 39,9	19 K potassium 39,1	29 Cu cuivre 63,5	20 Ca calcium 40,1	30 Zn zinc 65,4	21 Sc scandium 45,0	31 Ga gallium 69,7	22 Ti titane 47,9	32 Ge germanium 72,6
O	5	36 Kr krypton 83,8	37 Rb rubidium 85,5	47 Ag argent 107,9	38 Sr strontium 87,6	48 Cd cadmium 112,4	39 Y yttrium 88,9	49 In indium 114,8	40 Zr zirconium 91,2	50 Sn étain 118,7
P	6	54 Xe xénon 131,3	55 Cs césium 132,9	79 Au or 197,0	56 Ba baryum 137,3	80 Hg mercure 200,6	57 La lanthane 138,9	81 Tl thallium 204,4	72 Hf hafnium 178,5	82 Pb plomb 207,2
Q	7	86 Rn radon 222	87 Fr francium 223		88 Ra radium 226,1		89 Ac actinium 227		104 Ku Kourtchatovium 260	

Lanthanides (terres rares)

58 Ce cérium 140,1	59 Pr praséodyme 140,9	60 Nd néodyme 144,2	61 Pm prométhium 145

Actinides (uraniens)

90 Th thorium 232,0	91 Pa protactinium 231	92 U uranium 238,0	93 Np neptunium 237

V		VI		VII		VIII		
7 N azote 14,0		8 O oxygène 16,0		9 F fluor 19,0				
15 P phosphore 31,0		16 S soufre 32,1		17 Cl chlore 35,5				
23 V vanadium 50,9	33 As arsenic 74,9	24 Cr chrome 52,0	34 Se sélénium 79,0	25 Mn manganèse 54,9	35 Br brome 79,9	26 Fe fer 55,8	27 Co cobalt 58,9	28 Ni nickel 58,7
41 Nb niobium 92,9	51 Sb antimoine 121,8	42 Mo molybdène 95,9	52 Te tellure 127,6	43 Tc technétium 99	53 I iode 126,9	44 Ru ruthénium 101,1	45 Rh rhodium 102,9	46 Pd palladium 106.4
73 Ta tantale 180,9	83 Bi bismuth 209,0	74 W tungstène 183,9	84 Po polonium 210	75 Re rhénium 186,2	85 At astate 210	76 Os osmium 190,2	77 Ir iridium 192,2	78 Pt platine 195,1

62 Sm samarium 150,4	63 Eu europium 152,0	64 Gd gadolinium 157,3	65 Tb terbium 158,9	66 Dy dysprosium 162,5	67 Ho holmium 164,9	68 Er erbium 167,3	69 Tm thulium 168,9	70 Yb ytterbium 173,0	71 Lu lutétium 175,0
94 Pu plutonium 242	95 Am américium 243	96 Cm curium 246	97 Bk berkelium 249	98 Cf californium 249	99 Es einsteinium 254	100 Fm fermium 255	101 Md mendélevium 256	102 No nobélium 253	103 Lw lawrencium 257

Ce phénomène se répète pour deux autres séries de transitions de dix atomes ayant tous deux des électrons sur leurs couches externes, qui sont respectivement les couches O et P.
On conçoit qu'une telle représentation n'est guère pratique ; aussi choisit-on une représentation plane du tableau de Mendéléïev ♦. ♦ Voir page 42.
Notons que, si plusieurs atomes peuvent avoir à la fois :
— la même couche externe,
— le même nombre d'électrons sur cette couche (cas des atomes allant du calcium au zinc),
— des numéros atomiques différents,
c'est tout simplement que les couches internes ne sont pas saturées. Ainsi, dans l'exemple concernant les 10 corps dont les numéros atomiques vont de 21 à 30, la sous-couche *g* (qui correspond au nombre quantique $l = 4$) de la couche M se remplit de 1 à 10 électrons. Remarquons que les gaz rares (néon, argon, krypton, xénon, radon...) n'ont aucune propriété chimique, ce qui signifie que leur couche externe est saturée (il suffit pour cela que les sous-couches *s* et *p* ♦ soient saturées). Ces gaz nous apparaissent donc dans le même groupe (même colonne). Et, comme l'hélium ressemble à ces gaz rares par son inertie chimique, on le place habituellement dans cette même colonne (colonne du tableau de Mendéléïev). Or, selon les représentations, on trouve, par exemple, le néon sur la couche L, avec 8 électrons dans cette couche, ou bien sur la couche M, avec 0 électron. L'argon se trouve sur la couche L avec 8 électrons, ou sur la couche N avec 0 électron, etc. ♦ Voir Éléments de transition.

LE NOYAU

Le noyau constitue la majeure partie de l'atome. C'est lui qui possède la presque totalité de la masse. La physique nucléaire consiste en l'étude de ce noyau. C'est encore lui qui libère l'énergie dans les piles et les bombes atomiques.

Les composants du noyau atomique

Il est composé de protons et de neutrons. Ces deux particules forment deux états quantiques d'une même entité, le nucléon. Le proton est un nucléon électriquement chargé et le neutron est un nucléon électriquement neutre.
Le neutron joue un rôle prépondérant : considéré comme une particule matérielle, il a, hors du noyau, les caractéristiques suivantes :
— il est doté d'une masse bien définie ;
— il tourne sur lui-même ;
— il a une charge électrique globale nulle ;
— il se comporte comme un aimant ;
— il est radioactif ;
— à l'état libre, sa vitesse varie dans de larges limites.

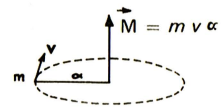
En admettant, d'une part, qu'un atome-gramme contienne $6{,}02.10^{23}$ atomes réels et, d'autre part, que l'atome-gramme d'oxygène pris comme référence ait une masse = 16, les données numériques relatives aux neutrons sont les suivantes, dans le système d'unité C.G.S. ♦ :

$$\textit{Masse du neutron} = \frac{1{,}008937}{6{,}02.10^{23}}\ \text{g} = 1{,}008982 \pm 3 \times 10^{-6}\ u.m.a.$$

(*u.m.a.* = unité de masse atomique).

♦ Système d'unité basé sur le centimètre, le gramme et la seconde.

Mouvement de rotation. Caractérisé par le moment de la quantité de mouvement par rapport à un axe ou moment cinétique de rotation ou spin :



le spin du neutron étant de $\frac{1}{2}$, son moment cinétique est égal à $\frac{h}{4\pi} = \frac{1}{2} - \frac{6{,}6.10^{-27}}{6{,}28}$.

Magnétisme. La rotation du neutron produit un moment magnétique. L'unité de moment magnétique ou magnéton nucléaire vaut 1,91354.

Le neutron libre a une période de 14 mn, c'est-à-dire que, si *n* neutrons sont émis au temps $t = 0$, il n'en reste plus que $\frac{n}{2}$ 14 mn après, l'autre moitié s'étant détruite en donnant des protons, des électrons et des neutrinos.

Le tableau suivant permet de comparer les caractéristiques des protons et des neutrons.

nucléon	masse	spin	moment magnétique	charge ♦
neutron	1,0089937	$\pm \frac{1}{2}$	— 1,91854	0
proton	1,008130	$\pm \frac{1}{2}$	2,79353	+ 1

♦ L'unité de charge est, au signe près, la charge de l'électron, c'est-à-dire $4{,}77.10^{-10}$ C.G.S. = $1{,}6.10^{-19}$ coulomb.

L'atome d'un élément est formé :
— d'un noyau comprenant Z protons et N neutrons ;
— d'une pulpe entourant le noyau de Z électrons.

Z représente la charge du noyau, A = N + Z le nombre de masse de cet atome.

La masse de l'électron étant 1 840 fois plus faible que celle du nucléon, la masse atomique d'un élément est, en première approximation, égale au nombre de nucléons (chacun d'eux ayant une masse voisine de 1).

Un atome se caractérise finalement par sa charge et sa masse, c'est-à-dire par les valeurs de Z et A.

Si on prend l'exemple de l'aluminium (Al), dont l'atome est formé de 27 nucléons dont 13 protons, on aura A = 27 et Z = 13, d'où $^{27}_{13}$Al.

En dehors des protons et des neutrons, il existe d'autres particules (positrons, antiprotons, mésons, photons, neutrinos) ♦ dont l'existence est souvent très éphémère, mais qui interviennent lors de réactions nucléaires pour assurer le respect des lois régissant ces réactions (conservation de la quantité d'électricité, du moment cinétique, etc.).

♦ Voir l'article : la physique des hautes énergies: les Particules.

Le positron (électron positif) se présente comme un électron dont la charge électrique, au lieu d'être — *e*, est *e* ♦.
Le positron apparaît, par exemple, lorsqu'un photon de grande énergie tombe sur de la matière et disparaît. Son énergie se matérialise sous la forme d'une « paire » (c'est-à-dire un électron et un positron). De même, si un positron rencontre un électron, ils s'annihilent en formant deux photons dont l'énergie est de 500 000 *e*V pour chacun. Cela explique l'absence presque totale de positron à l'état libre.

♦ La masse de l'électron est de 9,106 × 10^{-28} g ; sa charge est ^{-}e = 1,6019 × 10^{-19} *c* ; son spin est + $\frac{1}{2}$.

L'antiproton est une particule de même masse que le proton, mais dont la charge électrique est opposée. Elle est donc identique à celle de l'électron : — *e*. Il n'existe pratiquement pas à l'état libre ; on ne l'observe que dans le champ des puissants accélérateurs de particules.

Les mésons sont les particules dont l'existence fut prédite par Yukawa et dont les masses sont intermédiaires entre les électrons et les nucléons. On en distingue plusieurs types :
1. Le méson π^0 est neutre, instable, de période 10^{-14} s ; il se désintègre en deux photons, sa masse est égale à 272 fois celle de l'électron et son spin est 0.
2. Le lepton μ est chargé positivement, sa période est de 2 × 10^{-8} s ; il se désintègre en un neutrino et une particule de masse 2^{12} chargée positivement ou négativement, appelée méson μ.
La masse du méson μ est de 276 fois celle de l'électron, son spin est 0 ou 1.
D'autres mésons existent encore qui se désintègrent en mésons π_0, π ou μ.

Le photon est la forme corpusculaire de tout rayonnement électromagnétique ; sa masse au repos est nulle ♦, sa charge est également nulle et son spin est 1.

♦ L'énergie du photon est purement électromagnétique. L'énergie cinétique est nulle à une vitesse nulle, contrairement au cas d'une particule matérielle dont la masse au repos, conformément à la relation d'Einstein, est équivalente à une énergie E = $m_0 c^2$.

Le neutrino a au repos une masse à peu près nulle (≃ 30 fois moins grande que celle de l'électron), une charge nulle et un spin de $\frac{1}{2}$.
Cette particule se manifeste entre autres lors des désintégrations β où apparaît un déficit en énergie, en quantité de mouvement et en moment cinétique. Car les lois de la mécanique indiquent que ces

quantités doivent rester invariables. Le neutrino a donc pour rôle de combler ce déficit.
D'après les valeurs des nombres A et Z caractérisant les noyaux, on définit :

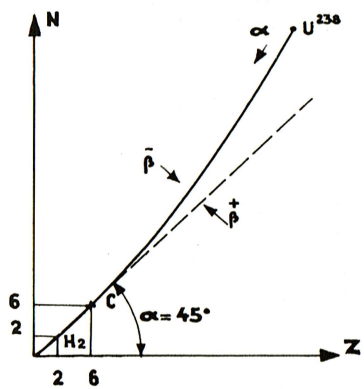
Les isotopes : atomes ayant des noyaux à même nombre de protons Z (donc même nombre d'électrons périphériques, donc mêmes propriétés chimiques). Par exemple : $^{235}_{92}$ U et $^{238}_{92}$ U.

Les isobares : atomes ayant le même nombre de masse A, comme le carbone et l'azote : $^{14}_{6}$ C et $^{14}_{7}$ N.

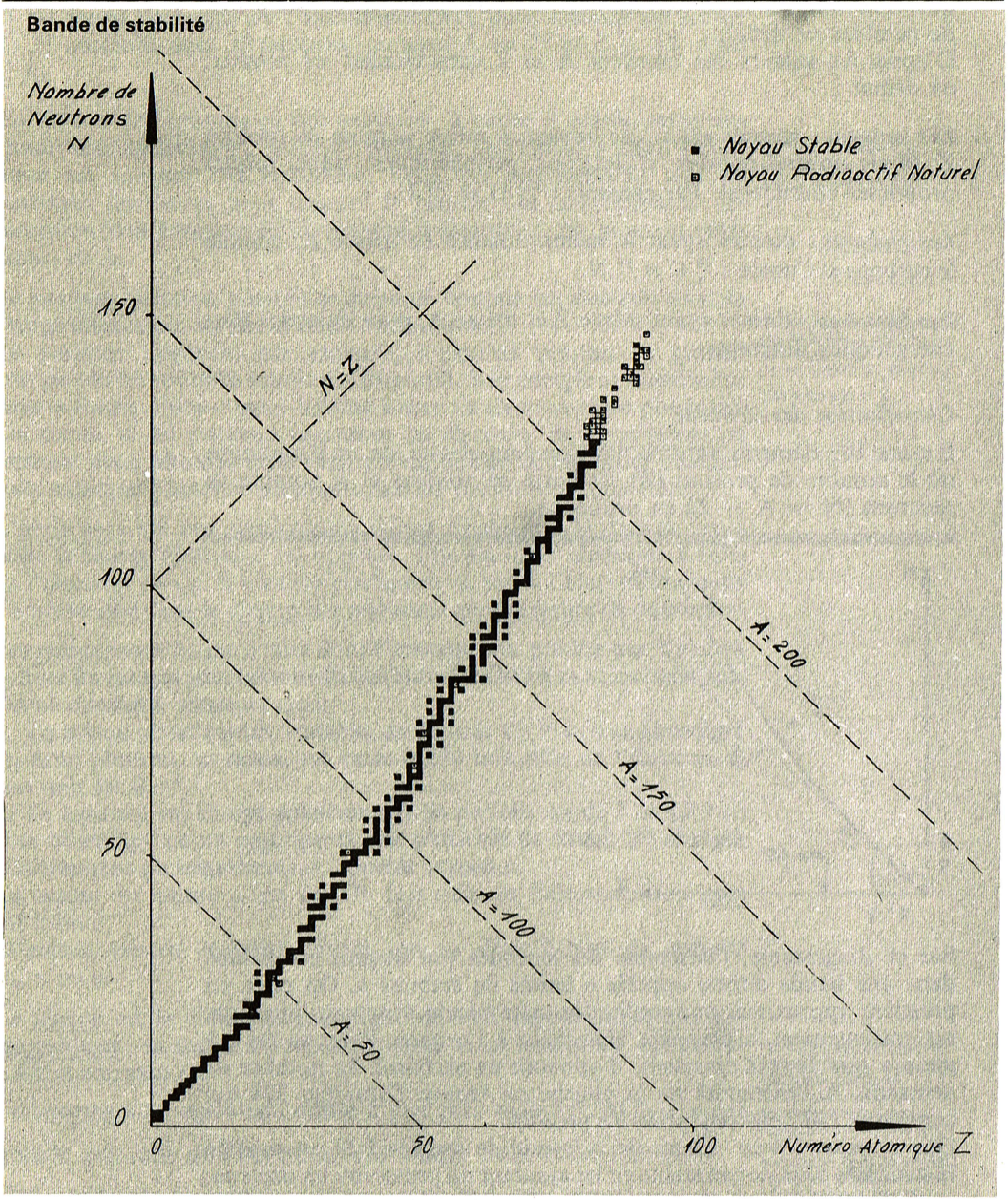
Les isomères : atomes ayant même Z et même A, mais dans des états énergétiques différents.

Classification des éléments

Il existe 103 éléments naturels que l'on peut classer sur un diagramme où le nombre de protons (Z) est porté en abscisse et le nombre de neutrons (N = A — Z) en ordonnée.



Sur ce diagramme, l'ensemble des nuclides (ou noyau) est groupé dans une bande étroite appelée « bande de stabilité ». On peut, en première approximation, confondre cette bande avec une ligne, qui est pratiquement la première bissectrice à l'origine. Puis, au fur et à mesure que N et Z croissent, il apparaît un excédent du nombre de neutrons. A l'extrémité de la courbe on trouve l'uranium 238 qui comporte 146 neutrons pour 92 protons.
Que se passe-t-il en dehors de la bande de stabilité? Si on modifie la structure d'un noyau stable en lui ajoutant un proton ou un neutron, on fait apparaître un noyau radioactif artificiel.
Il existe 3 types de radioactivités : β, α, γ.


Bande de stabilité
Nombre de Neutrons N
Noyau Stable
Noyau Radioactif Naturel
150
100
50
0
N=Z
A=200
A=150
A=100
A=50
0
50
100
Numéro Atomique Z

La radioactivité β

Elle consiste en une transformation, au sein du noyau, de neutron en proton, ou réciproquement. Pour respecter le principe de la conservation de la quantité d'électricité, cette transformation s'accompagne de l'émission d'un électron ou d'un positron. Ainsi, des nuclides se trouvant de part et d'autre de la bande de stabilité (donc présentant des neutrons ou des protons en excédent par rapport aux nuclides stables) sont radioactifs et sont dans un état métastable ♦. Ces nuclides se transforment par émission β+ (transformation d'un proton en neutron, avec émission d'un positron) ou β− (transformation d'un neutron en proton, avec émission d'un électron) et regagnent la bande de stabilité.

♦ Un état métastable est un état qui a l'apparence de la stabilité, mais qui, sous une influence extérieure peu importante, évolue vers un nouvel état très différent de l'état primitif. Un mélange d'hydrogène et d'oxygène est un équilibre métastable qui persiste jusqu'au moment où un faible apport d'énergie (étincelle électrique) provoque avec explosion la transformation en eau.

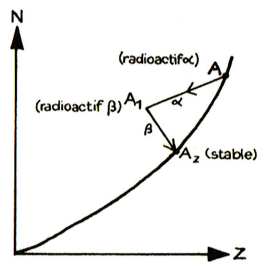
La radioactivité α

Elle consiste en l'émission d'une particule α. Cette particule se compose de 2 protons et de 2 neutrons (c'est donc un noyau d'hélium). Cette émission se traduit sur le diagramme par une translation parallèle à la bissectrice et dirigée vers l'origine, puisque le nuclide perd à la fois 2 protons et 2 neutrons.

La radioactivité α est observée chez les éléments radioactifs naturels tels que l'uranium. Ces éléments très lourds sont largement excédentaires en protons. Cet excédent de protons leur confère une énergie potentielle électrostatique, telle que l'expulsion des deux charges élémentaires (les 2 protons) de la particule α est « exoénergétique ». Après cette émission α, le noyau peut se trouver instable du point de vue de la radioactivité β ♦, puisque la bande de stabilité est nettement inclinée par rapport à la bissectrice dans la zone des N et Z élevés, qui est celle des corps radioactifs naturels. Après émission β, le noyau se retrouve sur la bande de stabilité.

Ainsi s'explique le mécanisme des émissions α et β observées dans chacune des trois familles radioactives issues de l'uranium 238 et du thorium 232, aboutissant chacune à un isotope stable du plomb.

♦ A partir du graphique de la bande de stabilité, page précédente, le croquis ci-dessous montre le déplacement d'un noyau radioactif α.



La radioactivité γ

Elle consiste en l'émission du photon, lorsque le noyau a été excité.

Les nombres quantiques des nucléons

Les protons et les neutrons sont, eux aussi, soumis pour leurs mouvements à des lois qui leur interdisent de prendre n'importe quelle orbite. Les orbites possibles sont caractérisées par quatre nombres quantiques semblables à ceux des électrons, qui sont *n*, *l*, *j*, *m*.

— *n détermine l'énergie du nucléon sur son orbite*, autrement dit sa vitesse, mais il ne caractérise pas le rayon de l'orbite (comme c'est le cas pour les électrons), car tous les nucléons se déplacent sur des orbites ayant pratiquement le même rayon. *n* croît avec la vitesse.

— *l détermine la forme de l'orbite.* Toutes les orbites sont elliptiques si l'on considère le cercle et la droite comme les cas extrêmes de l'ellipse. Aussi, plus la valeur de l est élevée, plus l'orbite tend à être circulaire. Pour $l = 0$, l'orbite est réduite à une simple vibration rectiligne de part et d'autre du centre du noyau.
— *j caractérise le sens du mouvement orbital du nucléon.* Il indique si ce mouvement est du même sens que le spin.
— *m détermine l'inclinaison de l'orbite dans l'espace.*

Comme pour les électrons, ces quatre nombres quantiques déterminent complètement une orbite.
Ces nombres peuvent prendre les valeurs entières ou demi-entières suivantes :

$$n = 1, 2, 3 \ldots$$
$$l = (n - 1), (n - 3), (n - 5), \ldots 0.$$
$$j = \left(l + \frac{1}{2}\right), \left(l - \frac{1}{2}\right).$$
$$m = j, (j - 1), (j - 2), \ldots (-j).$$

Les orbites pour lesquelles n est petit ($n = 1$ étant la plus petite valeur) correspondent aux énergies orbitales les plus faibles. Ces groupements d'énergie s'appellent couches, par analogie avec les couches électroniques. Il faut cependant ne pas pousser trop loin cette analogie ♦.
Pour les nucléons, les orbites ont pratiquement toutes les mêmes dimensions, alors que, pour les électrons, on détermine non seulement l'énergie mais le rayon de l'orbite (supposée circulaire).
Le principe d'exclusion de Pauli régit également le mouvement des nucléons ♦. Il exige qu'il n'y ait qu'un proton et qu'un neutron sur chaque orbite (les protons et les neutrons n'ont pas tout à fait les mêmes orbites, même lorsque les quatre nombres quantiques sont égaux).
Quant à l'énergie des nucléons, elle est de un million de fois plus élevée que celle des électrons.

♦ En effet, si on compare le nombre d'électrons d'un atome dans la couche $n = 2$ avec le nombre d'orbites possibles des nucléons ayant également $n = 2$, on trouve 8 électrons, mais 6 orbites possibles seulement.

♦ Voir page 256.

Les forces nucléaires

Si l'on conçoit aisément que les électrons et les nucléons coexistent en annulant leurs charges électriques (l'atome reste électriquement neutre) et en s'attirant mutuellement ♦, il peut paraître surprenant que le noyau, dans lequel on ne trouve que des charges électriques de même signe (les charges positives des protons), puisse rester cohérent.
Les nucléons sont, en effet, soumis au champ de force électrique coulombien ♦ agissant à distance. Ce champ, créé par les protons, tend à les séparer ; il n'agit pas sur les neutrons. Il existe un second champ de force qui s'oppose au précédent et qui est responsable de la cohésion du noyau.

♦ Cette force d'attraction est due à une charge opposée équilibrée par la force centrifuge.

♦ Voir page 54.

Ce champ de « forces nucléaires », créé par tous les nucléons, tend à les agglomérer. Il agit sur une très courte distance, de l'ordre de 10^{-13} cm.

Que se passe-t-il donc lorsqu'une particule tente de pénétrer un atome, de rayon r♦ ? Si l'on trace :

— en abscisse, la distance de la particule au centre du noyau ;

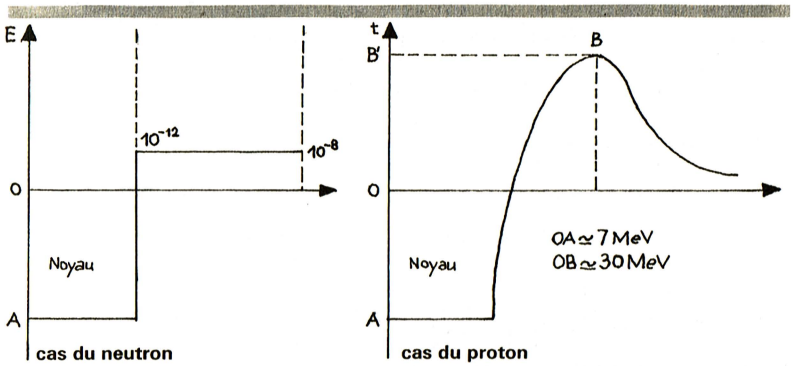
— en ordonnée, l'énergie à fournir au système (noyau-particule), pour que la particule puisse avancer vers le centre.

Deux cas différents se présentent :

— *Cas du neutron* : Si la particule est un neutron, celui-ci n'a presque pas besoin d'énergie cinétique pour entrer dans la pulpe électronique. En pénétrant dans le noyau, le neutron perd soudain de l'énergie et tombe dans un « puits » de potentiel comme un caillou tombe dans un puits en perdant de l'énergie potentielle.

♦ Le rayon du noyau est convenablement représenté par la formule :

$r = 1{,}5 \times A^{\frac{1}{3}} \times 10^{-13}$ cm, où A = masse atomique.

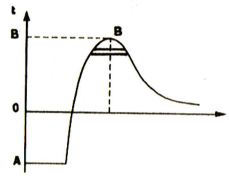


L'énergie perdue par le neutron est cédée au noyau. Stabilisé dans le noyau, le neutron qui a perdu de l'énergie a une masse plus faible que celle qu'il avait à l'état libre. Cette différence de masse est égale à : $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$, où ΔE = énergie perdue, et c = vitesse de la lumière.

— *Cas du proton*. Si, maintenant, la particule incidente est un proton, au voisinage de l'atome, il commence à ressentir la répulsion électrique du noyau ; sa charge positive tend, en effet, à l'écarter du noyau, lui-même chargé positivement. Cette répulsion devient de plus en plus forte au fur et à mesure qu'il s'approche du noyau. Finalement, il ne pourra entrer en contact avec le noyau que s'il possède une énergie cinétique suffisante pour vaincre cette répulsion électrique. On dit qu'il lui faudra franchir la barrière du potentiel B'O ♦.

Une fois cette barrière franchie, les attractions nucléaires entrent en jeu et le proton se précipite dans le noyau en cédant de l'énergie : OA. Le proton est à son tour dans le puits de potentiel, ce puits représentant l'énergie de la particule incluse dans le noyau.

♦ Il existe cependant une possibilité, pour le proton, de pénétrer le noyau, même si son énergie cinétique est insuffisante pour franchir la barrière de potentiel : c'est l'effet tunnel. Tout se passe comme si le proton forait un tunnel dans la montagne au lieu de gravir celle-ci pour redescendre de l'autre côté. La probabilité pour qu'un proton puisse bénéficier de cet effet, dû au caractère ondulatoire de la particule, est faible. Elle est cependant d'autant plus grande que la longueur du « tunnel » est faible.



Comme pour le neutron, la masse du proton est plus petite dans le noyau qu'à l'état libre. Cette diminution de masse, conforme à la théorie de la relativité, mesure la cohésion du noyau. Plus elle est grande, plus le noyau est solide et plus il est stable.
Si M est la masse exacte d'un nucléon (en comptant la disparition de masse due à l'agglomération des nucléons) et A la masse atomique théorique, le rapport $\frac{M}{A}$ mesure la masse moyenne d'un nucléon aggloméré dans le noyau. Plus ce rapport est petit, plus le noyau est stable.

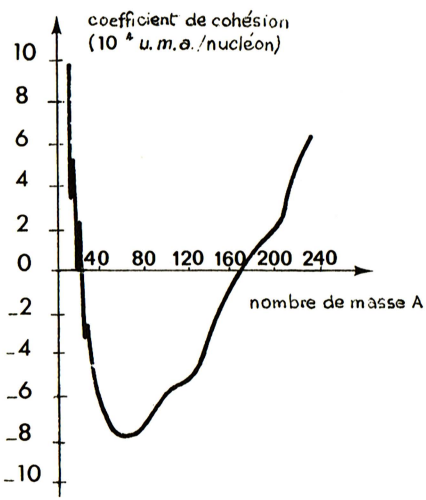
LE DÉFAUT DE MASSE

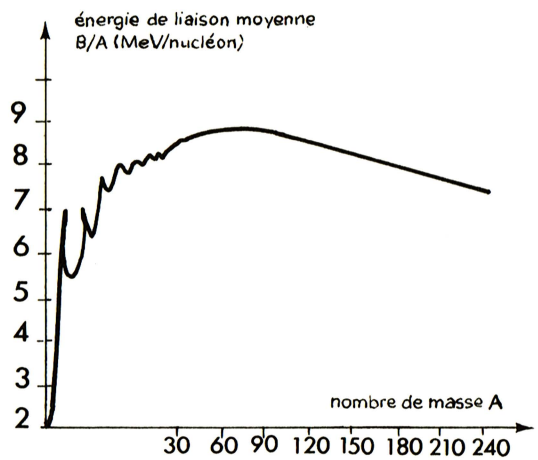
Les phénomènes d'énergie nucléaire peuvent être décrits grâce à ce qu'on appelle « défaut de masse » ♦, qui est la perte moyenne de masse (donc d'énergie) subie par le nucléon en passant de l'état libre à l'état aggloméré. Si on étudie la variation du rapport $\frac{M}{A}$ en fonction du nombre de masse A, on observe que $\frac{M}{A}$ est d'abord égal à 1,008 pour un nucléon non aggloméré.

♦ Défaut de masse ou « packing fraction ».

Dès que le proton et le neutron sont combinés, $\frac{M}{A}$ varie très rapidement.

On appelle « packing fraction » la différence $1{,}008 - \frac{M}{A}$, qui repré-





sente l' « énergie de liaison » moyenne d'un nucléon de l'élément de masse atomique A. Plus cette différence est grande, plus le noyau est stable ; pour les éléments avoisinants le fer et le nickel, le défaut de masse est le plus fort. Pour ces éléments, la stabilité est maximale, les nucléons sont très solidement liés au noyau. La différence de masse entre un nucléon à l'état libre et un nucléon de fer est sensiblement de $\frac{8}{1\,000}$ unité de masse atomique ♦.

♦ Unité de masse atomique = *u.m.a.* 1 *u.m.a.* = $1{,}6599 . 10^{-24}$ g = $1{,}6599 . 10^{-27}$ kg.

L'énergie correspondant à la variation de masse ΔM est $E = \Delta M \times c^2$ (relation d'Einstein) = 8 M*e*V, ΔM étant le défaut de masse.
La différence de masse entre un nucléon d'uranium et un nucléon de fer est de 1 M*e*V.
Les fissions nucléaires qui coupent en deux un noyau d'uranium mettent en jeu des énergies de l'ordre de 1 M*e*V par nucléon, ce qui correspond à des pertes de masse de l'ordre de $\frac{1}{1\,000}$.
Les fusions nucléaires qui soudent entre eux des atomes légers mettent en jeu des énergies de 8 M*e*V par nucléon, soit 8 fois plus que pour la fission.
Cette notion d'énergie de liaison est capitale pour la compréhension des phénomènes de radioactivité, de fission ou de fusion.

Considérons un noyau formé de A nucléons. Si l'on pouvait « peser » chacun des nucléons, protons et neutrons, à l'état libre, on pourrait dire en mécanique classique, que le noyau constitué de protons et de $N = Z - A$ neutrons devrait avoir pour masse : $M = ZM_p + NM_n$, où M_p = masse du proton à l'état libre et M_n = masse du neutron à l'état libre.
Or il n'en est rien.
En effet, si l'on compare les masses des nucléons composant un atome d'hélium au poids de l'atome formé, on obtient :

$$M = 2 \times 1{,}008142 + 2 \times 1{,}00982 = 4{,}034248 \text{ u.m.a.},$$

alors que la masse mesurée de l'atome d'hélium est de 4,003880 u.m.a., soit une différence de 0,030368 unités de masse ou 28 M*e*V. Il y a donc une diminution de masse lorsque deux protons et deux neutrons se combinent pour former un noyau. Cette diminution de masse correspond à la perte d'énergie que subissent les nucléons tombant dans le puits de potentiel.
Comme il y a 4 nucléons, la perte d'énergie par nucléon est de 7 M*e*V. Cette énergie est l'énergie moyenne nécessaire pour arracher un nucléon du noyau.
C'est l'énergie de liaison du nucléon.
L'expression générale de l'énergie de liaison moyenne est :

$$\overline{L} = \frac{ZM_p + (A - Z)M_n - M}{A} \text{ u.m.a.}$$

Cette grandeur est directement reliée au défaut de masse f :

$$\overline{L} = (7{,}94 - f) \text{ MeV}.$$

On peut donc tracer $\overline{L}$ en fonction de A, comme on l'avait fait pour le défaut de masse.

L'énergie de liaison est la somme de plusieurs énergies qui sont :
— l'énergie due aux forces nucléaires, E_n ;
— l'énergie due aux forces superficielles, E_s ;
— l'énergie due aux forces électriques, E_c.

L'énergie d'interaction nucléaire (E_n)
Cette énergie, qui représente en quelque sorte l'énergie potentielle due à la position des nucléons dans le noyau, se présente sous la forme : $E_n = C_n A$, où $C_n \simeq 14$ MeV ($A = N + Z$).

L'énergie de tension superficielle (E_c)
Cette énergie est d'autant plus grande que le rapport $\frac{\text{surface}}{\text{volume}}$ du noyau est grand (c'est-à-dire que le rayon r est petit). Cette énergie, proportionnelle à la surface du noyau, est de la forme :

$$E_s = -C_s A^{\frac{2}{3}}, \quad \text{où} \quad C_s \simeq 13 \text{ MeV}.$$

L'énergie coulombienne (E_c)
Cette énergie est due à la répulsion qu'exercent les protons entre eux. Elle s'oppose elle aussi aux forces nucléaires et tend également à diminuer l'énergie de liaison. Elle est de la forme $E_c = C_c A^{\frac{5}{3}}$, où $C_c \simeq 0{,}59$ MeV.
Finalement l'énergie totale du noyau A peut s'écrire sous la forme :

$$\bar{L} = -E_n + E_s + E_c = -C_n A + C_s A^{\frac{2}{3}} + C_c A^{\frac{5}{3}}$$

et celle d'un nucléon : $\bar{L} = -E_n + C_s A^{-\frac{1}{3}} + C_c A^{\frac{2}{3}}$.

Si on applique cette formule pour calculer l'énergie de liaison moyenne d'un nucléon uranium 235, on trouve qu'elle est égale à 6,51 MeV.
Or la lecture de $\bar{L}$ (sur la courbe) donne 7,5 MeV ♦. ♦ Voir page 52.
La théorie précédente est donc incomplète. Il faut introduire des termes supplémentaires dans le calcul de l'énergie du noyau, qui sont l'asymétrie et la parité.

Si on regarde avec attention la « bande de stabilité » où sont groupées toutes les espèces nucléaires, on peut remarquer certains groupements possibles qui permettent d'effectuer le classement suivant :

A	pair		impair	
Z	pair	impair	pair	impair
N	pair	impair	impair	pair
nombre des nuclides	162	4	56	52

Les noyaux stables, pour lesquels le nombre de nuclides est pair, et qui ont à la fois un nombre Z de protons pair et un nombre N de neutrons impair sont les plus nombreux. Au contraire, ceux pour lesquels N et Z sont impairs sont très rares. On peut exprimer cette remarque d'une autre façon. Les noyaux les plus stables sont ceux pour lesquels les nombres A, Z et N sont pairs.
Or les nuclides ayant A et Z pairs paraissent avoir un spin nul, ce qui permet de penser que les nucléons de même espèce sont groupés par paires avec des spins opposés sur les mêmes niveaux énergétiques. C'est d'ailleurs ce que prévoit le principe d'exclusion de Pauli.
De plus, chaque niveau énergétique peut contenir (s'il est complet) 2 protons et 2 neutrons, les spins de chaque paire étant dirigés en sens inverse. Ce groupe de 4 nucléons constitue un système stable.

L'énergie d'asymétrie (E_a)

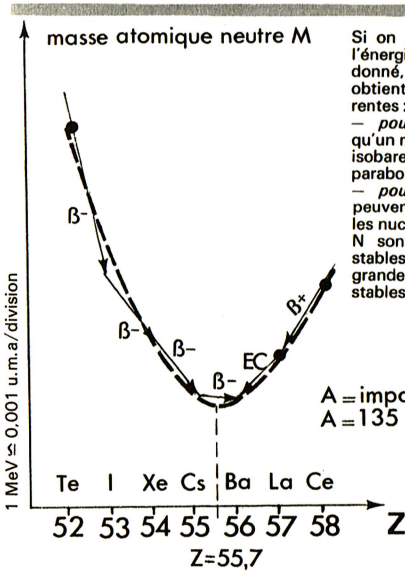
Sur la « bande de stabilité ♦ », la tendance à la symétrie de composition neutron-proton se manifeste fortement dans le cas des noyaux légers ; on a alors l'égalité N = Z. Puis il apparaît un excédent de neutrons qui entraîne l'augmentation du rapport $\frac{N}{Z}$, égal à 1,5 pour A = 240 ♦.

♦ Voir page 48.

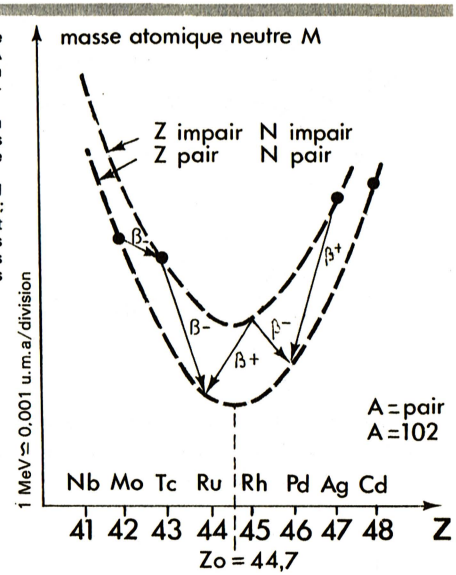
♦ L'énergie correspondante, due à un phénomène d'origine quantique, est de la forme :
$E_a = -C_a \frac{(A-2Z)^a}{A}$,
où C_a = 19,4 MeV.
♦ Voir page 256.

L'énergie de parité (E_p)

Le principe d'exclusion de Pauli interdit à deux particules de se trouver au même niveau énergétique si leurs 4 nombres quantiques sont identiques ♦.
Il suffit donc qu'un seul de ces nombres soit différent pour que 2 particules puissent coexister. Elles peuvent donc se distinguer par les



Si on étudie la variation de l'énergie de liaison pour un A donné, en fonction de Z, on obtient deux figures différentes :
— *pour un A impair :* il n'y a qu'un nuclide stable, les autres isobares se situent sur une parabole ;
— *pour un A pair :* Z et N peuvent être pairs ou impairs ; les nuclides pour lesquels Z et N sont pairs sont les plus stables (énergie de liaison plus grande). Plusieurs nuclides stables peuvent exister.



spins égaux à $+\frac{1}{2}$ et $-\frac{1}{2}$, correspondant à deux positions opposées du vecteur ♦ moment cinétique de rotation.

♦ Voir Aperçu mathématique page 16.

Les états correspondant aux niveaux d'énergie les plus bas sont occupés les premiers. Ils sont saturés par des paires de particules identiques (au spin près). Si un nucléon supplémentaire se présente, il occupera un niveau plus élevé.

Formule de la masse

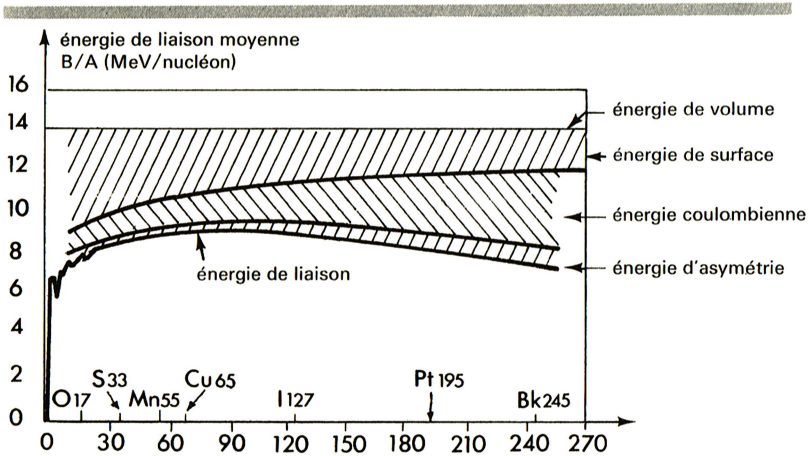
La masse du noyau est la somme de la masse des nucléons et de l'équivalent de masse de l'énergie de liaison (ou du défaut de masse). La formule complète est la suivante :

$M = ZM_p + (A - Z)\,M_n - E_n + E_s + E_c + E_a + E_p$, où M_p = masse du proton, M_n = masse du neutron.

Qui peut se mettre sous la forme ·

$M = A + BZ + CZ^2$ (où A est la somme des termes ne contenant pas Z, B est la somme des coefficients de Z, C est la somme des coefficients de Z^2).

On peut tracer, sur le même schéma, l'énergie de liaison moyenne $\overline{L}$ (par nucléon) et les différentes constituantes de cette énergie en fonction de A.



Termes pseudopériodiques liés à la structure en couches

Il existe dans le noyau des nombres de constituants correspondant à une stabilité plus grande, appelés « nombres magiques » ; ce sont : 2, 8, 20, 50, 82, 126.

Les nuclides qui présentent un nombre Z ou N égal à l'une de ces valeurs manifestent une stabilité plus grande que les autres.

LA RADIOACTIVITÉ

La découverte de la radioactivité

En 1896, Henri Becquerel étudiait ce qu'il croyait être la fluorescence des sels d'uranyle excités par la lumière. Pour cela, il exposait à la lumière solaire des lamelles de ces sels disposés sur un châssis opaque contenant une plaque photographique, puis il développait cette plaque. Or, au niveau des lamelles, il apparaissait toujours un voile sur la plaque photographique, caractéristique d'un rayonnement capable de traverser le châssis opaque, ce qui laissait penser à Becquerel que ces sels étaient bien fluorescents. Par suite du manque de soleil, le savant dut interrompre ses essais et il rangea ses châssis chargés dans un tiroir. Il eut la curiosité de développer les plaques photographiques des châssis restés dans l'obscurité et il fut surpris de constater la présence du même voile que sur la plaque soumise à l'insolation. Il fut ainsi conduit à rejeter l'hypothèse selon laquelle ces voiles étaient dus à la lumière solaire et à admettre l'existence d'un rayonnement propre des sels d'uranyle. Il appela ce rayonnement la radioactivité.

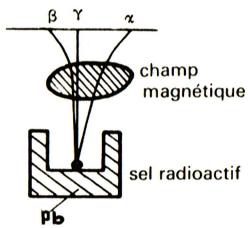
Pierre et Marie Curie devaient ensuite découvrir d'autres substances radioactives, dont le radium, un million de fois plus radioactif que l'uranium. A la suite des travaux de Becquerel, Rutherford et Villard, on en vint à admettre non plus un, mais trois rayonnements radioactifs. Ces rayonnements furent mis en évidence en soumettant le rayonnement à un champ magnétique intense. On remarqua ainsi l'existence de trois taches lumineuses sur l'écran fluorescent.

On pouvait donc dire que la radioactivité émettait 3 rayons différents. Les lois de l'électromagnétisme permirent alors de dire que :

— la tache α est due à des particules possédant une charge électrique positive ;

— la tache β est due à des particules possédant une charge électrique négative ;

— la tache γ, représentant la partie non déviée du faisceau par le champ magnétique, est donc électriquement neutre ; elle correspond soit à une vibration de même matière que la lumière ou les rayons X, soit à des particules non chargées.



Lors de ces expériences, on put également constater qu'une partie de ce rayonnement pouvait être facilement arrêté par de faibles épaisseurs de matière, tandis que le reste était très pénétrant. On peut aujourd'hui préciser les propriétés de ces trois rayonnements.

Le rayonnement α est formé de noyaux d'hélium électrisés positivement (il n'y a plus d'électrons pour rendre l'atome électriquement neutre). Ce noyau d'hélium (ou hélion) comporte 2 protons et 2 neutrons : $^{4}_{2}He$.

Il est peu pénétrant : quelques centimètres d'air l'arrêtent (de 1 à 8 cm).
Ces particules sont animées de vitesses pouvant atteindre 20 000 km/s.

Le rayonnement β est formé d'électrons en mouvement, donc chargés négativement. Ces particules β sont plus pénétrantes que les α puisqu'elles traversent quelques millimètres d'aluminium. Leur vitesse est plus grande que celle des particules α : elle peut atteindre 290 000 km/s.

Le rayonnement γ est pénétrant et peut traverser jusqu'à 20 cm de plomb.
Les rayons γ sont des rayons X à très haute fréquence et de très grande énergie. Contrairement aux rayons α et β, ils sont invisibles à la chambre de Wilson (cylindre contenant de la vapeur d'eau rendue saturante). Les β sont 100 fois plus pénétrants que les α, et les γ 100 fois plus pénétrants que les β.
La radioactivité s'accompagne d'une libération d'énergie. Sur 135 calories dégagées en 1 heure par 1 g de radium, 120 sont dues aux particules α, 9 aux particules β et 6 au rayonnement γ.
La radioactivité permet donc à un atome d'émettre des particules, ce qui modifie son noyau. Il devient alors un autre atome. Si celui-ci est radioactif, il va se transformer en un troisième, et ainsi de suite jusqu'à l'obtention d'un noyau stable. On dira qu'il y a eu transmutation de corps simple. Le vieux rêve des alchimistes devient donc réalité.

Les diverses radioactivités

Il n'existe en fait que deux sortes de radioactivités naturelles : les radioactivités α et β. Le rayonnement γ est toujours associé à l'un ou à l'autre. Les trois rayonnements ne sont jamais émis simultanément par le même noyau.
Ainsi, le radium subit la transformation :

radium ⟶ radon + α

soit $^{226}_{88}\mathrm{Ra} \longrightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$. Le radium est radioactif α.
Par contre, actinium ⟶ thorium + β

Ac ⟶ Th + β. L'actinium est radioactif β.

La radioactivité α

Le noyau est d'autant plus stable ♦ qu'il possède moins de nucléons (au moins à partir d'un certain nombre A). Un noyau peu stable, c'est-à-dire pour lequel l'énergie moyenne de liaison est faible, tend donc vers une forme plus stable en éjectant des nucléons. Ceux-ci sont organisés en hélions (noyaux ou particules d'hélium), forme particulièrement stable. Pour un noyau dont l'énergie moyenne de liaison serait de 8 MeV, l'énergie de liaison de 2 protons et de

♦ Voir page 49.

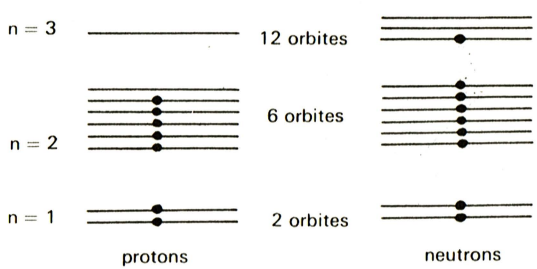
2 neutrons serait de $4 \times 8 = 32$ M*e*V, alors que celle d'une particule α est de 28 M*e*V ($\overline{L}$ pour l'hélium = 7 M*e*V). Il suffira donc de 4 M*e*V (+ 32 — 28) pour libérer une particule α, alors qu'il faudrait 8 M*e*V pour libérer un nucléon isolé. Lorsqu'un noyau pour lequel $\overline{L} = 8$ M*e*V se trouve excité d'une énergie supérieure à 4 M*e*V, il peut émettre une particule α. Pour des noyaux plus lourds (pour lesquels $\overline{L} < 8$ M*e*V), il faut de moins en moins d'énergie d'excitation pour émettre une particule α. Finalement, il n'en faut plus du tout et l'émission α devient spontanée pour les noyaux très lourds dans leur état normal. Cela est la raison de la non-existence à l'état naturel, sur la Terre, de noyaux plus lourds que l'uranium.

La radioactivité β

Il est plus difficile d'expliquer la radioactivité β, qui consiste en une émission d'électrons (positifs ♦ ou négatifs [plus de neutrinos]), puisqu'il n'existe pas d'électrons dans le noyau. L'exemple suivant peut fournir l'explication.

♦ L'électron positif ou positron est l'antiparticule de l'électron ; voir page 205.

Le noyau d'azote 16 contient 7 protons et 9 neutrons. On peut représenter l'état d'occupation des différentes orbites permises (caractérisées, entre autres, par le nombre quantique *n*) par le schéma suivant :



On voit que tous les protons sont répartis sur les orbites $n = 1$ et $n = 2$ et que la couche $n = 2$ n'est pas saturée, alors que les neutrons saturent les couches $n = 1$ et 2 et qu'un des neutrons occupe une des orbites $n = 3$. Si ce neutron se transformait en proton, il pourrait venir s'installer sur l'orbite de niveau $n = 2$ restée libre ; il aurait par conséquent une énergie plus basse.

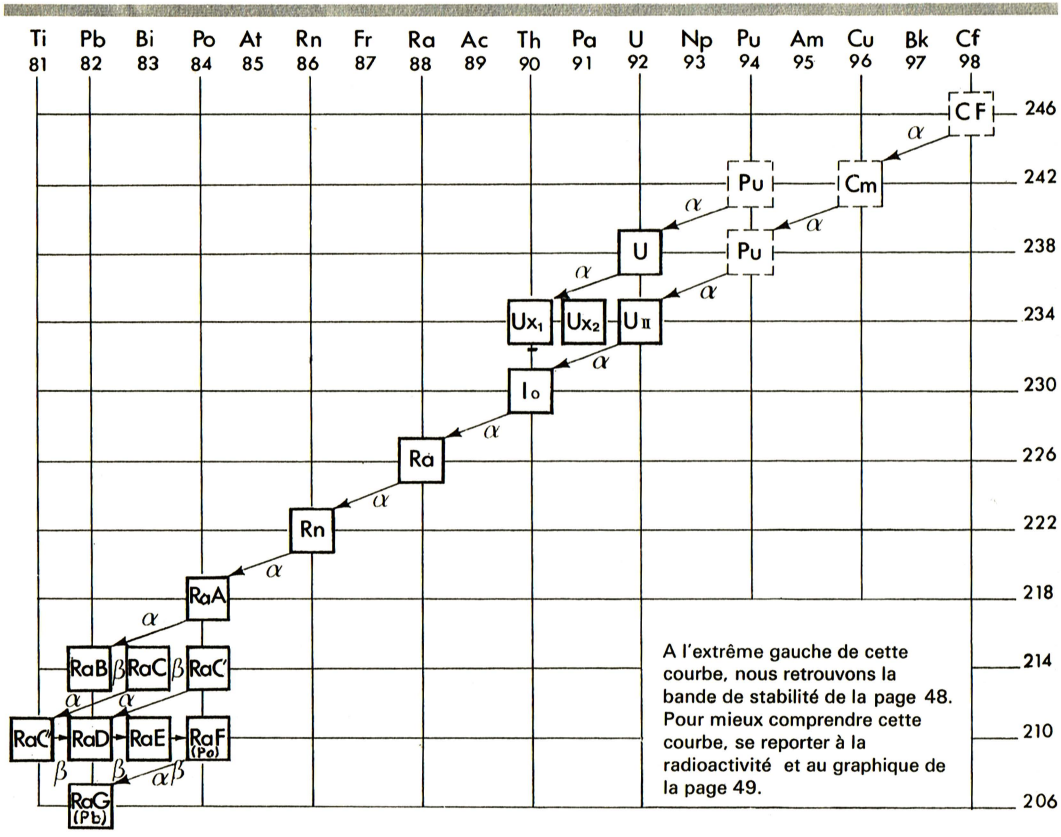
Un tel processus n'est possible que si l'énergie de système se trouve diminuée. Lors de cette transformation (neutron $\longrightarrow$ proton), il y a émission de deux particules : un électron (*e*) et un antineutrino (ν) : $\mu \longrightarrow p + e + \bar{\nu}$. L'émission de ces particules réalise la conservation de la quantité d'électricité de l'énergie cinétique et le respect des règles quantiques (spin). Ce processus est appelé radioactivité β^-

Il existe aussi une radioactivité β^+, dans laquelle un proton se

transforme en neutron. C'est le cas du noyau fluor F 16 comportant 9 protons et 7 neutrons. La transition s'écrit alors :
$P \longrightarrow n + e^{+} + \nu^{+}$,
où e^{+} = électron positif (positron), ν^{+} = neutrino.
La radioactivité β ne modifie pas la masse du noyau (puisqu'il n'y a pas émission de proton ou de neutron), elle ne modifie que la charge. Elle donne donc des isobares ♦.

♦ Voir page 47

La radioactivité γ
Cette radioactivité n'apparaît jamais seule (au moins dans la radioactivité naturelle). Elle est toujours associée au rayonnement α ou β. Dans une transmutation d'un corps A en un corps B, c'est le corps B qui donne le rayonnement γ. Pendant un temps très court, il se produit un réarrangement des charges du noyau. En effet, la transmutation peut faire qu'un nucléon se trouve sur une orbite à haute énergie, alors qu'une orbite à énergie plus basse est libre. Le nucléon va donc abandonner la première pour occuper la seconde, en émettant



un photon à haute énergie. Ces photons provenant du noyau forment le rayonnement.
Il est possible de provoquer artificiellement un rayonnement γ à l'aide du choc d'une particule sur un noyau (grâce à un accélérateur de particules, par exemple). Le noyau ainsi excité pourra émettre un rayonnement γ pur. Le noyau à l'état fondamental et le noyau à l'état excité comportent les mêmes nucléons. On les dit isomères ♦. ♦ Voir page 47.

Familles radioactives

Tous les corps radioactifs naturels appartiennent à trois familles, qui sont celles de l'uranium 235, de l'uranium 238, du thorium. On peut représenter ces filiations par un graphique.
Les trois isotopes du plomb (206, 207, 208) terminent les séries des nuclides stables vers les nombres de masses élevées, dans la bande de stabilité ♦. ♦ Voir figure, page 48.

Tableau des trois familles radioactives naturelles :

famille radioactive	nombre de masse de la forme	nuclide initial	période (en années)	nuclide final
thorium	νn	^{232}Th	$1{,}39.10^{10}$	^{208}Pb
uranium-radium	$\nu n + 2$	^{238}U	$4{,}50.10^{9}$	^{206}Pb
uranium-actinium	$\nu n + 3$	^{235}U	$8{,}52.10^{8}$	^{207}Pb

Il existe d'autres familles radioactives, mais elles sont artificielles car leurs périodes sont trop courtes pour avoir survécu à la période de stabilité nucléaire de la Terre. La plus durable serait celle du neptunium 237, de forme ($\nu n + 1$), de période $2{,}20.10^{6}$ années et dont le nuclide final est le bismuth 209.

La période

On appelle période le temps nécessaire à la désintégration de la moitié des atomes présents. Ainsi, si, au temps T_0, il existe 1 000 atomes radioactifs, il n'en restera plus que 500 au temps T_1 tel que $T_1 - T_0 = T$. On appelle vie moyenne, la quantité $\theta \simeq \frac{T}{0{,}7}$, dont l'inverse $\lambda = \frac{1}{\theta}$ est la constante radioactive du corps. λ représente la probabilité de désintégration d'un atome en une unité de temps (cette unité de temps ne doit pas être trop petite vis-à-vis de la période de l'élément).
La période du radium 238 est de 1 670 ans, celle de l'uranium 236 est de 4,4 milliards d'années et celle de l'uranium 235 d'environ

1 milliard d'années. Le tableau ci-dessous donne les principales caractéristiques des différentes particules intervenant dans les phénomènes de radioactivité.

particule	symbole	masse au repos (u.m.a.)	charges
particule α	α	4,00386	$+ 2e$
deutéron (μ + H)	D	2,01472	$+ e$
neutron	μ ou n	1,00894	0
proton	H ou P	1,00813	$\pm e$
électron	β	0,000584	$\pm e$
neutrino	ν	0	0
photon	γ	0	0

Les réactions nucléaires

Contrairement aux réactions chimiques, dans lesquelles les combinaisons des divers atomes présents se modifient alors que les atomes eux-mêmes restent inchangés, les réactions nucléaires modifient les atomes.

Les noyaux étant formés de protons et de neutrons, on aura conservation des nombres respectifs de protons et de neutrons, ces nucléons étant transférés d'un noyau à un autre. Cela est valable tant que l'énergie mise en jeu, au cours de la réaction, n'est pas trop élevée. L'énergie libérée au cours d'une réaction nucléaire correspond à la différence des énergies de liaison des nucléons entre le système initial et le système final. Cette énergie Q sera de l'ordre de plusieurs M*e*V.

De même, la différence des masses, entre les systèmes initial et final, sera liée à Q par les relations d'Einstein : $Q = \Delta mc^2$, où Δm n'est pas négligeable. Il n'y a plus ici conservation de la masse, mais seulement conservation du nombre de nucléons.

La radioactivité α est le premier exemple de réaction nucléaire. On peut symboliser cette réaction de la manière suivante :

$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \longrightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\alpha + Q$, où Q = énergie dégagée = 4,79 M*e*V.

En 1919, Rutherford provoque la première réaction nucléaire qui lui permit, en se servant de particules α produites par radioactivité, de transformer de l'azote en oxygène 17 avec formation d'hydrogène :

$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\alpha \longrightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} - 1{,}198$ M*e*V.

A l'aide d'accélérateurs de particules, Cockroft et Walton, en 1930, provoquèrent la désintégration du lithium :

$^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow 2\,{}^{4}_{2}\mathrm{He} + 17{,}346$ M*e*V.

Cette réaction « de fusion » se produit dans les étoiles et les bombes thermonucléaires ♦.

♦ Voir l'article : la Physique des plasmas, pages 473 à 477.

Une des plus importantes réactions nucléaires, base de la production industrielle à partir de l'« énergie atomique », fut découverte en 1939 par Hahn et Strassman : c'est la fission de l'uranium 235 :

$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{91}_{36}Ur + ^{142}_{56}Ba + 200$ M*e*V.

Cette réaction libère une énergie considérable de 200 M*e*V.

Energie libérée par les réactions nucléaires

Une réaction nucléaire se produit lorsque au moins deux noyaux (ou un noyau et une particule) entrent en collision. Dans les réactions chimiques, lorsque des atomes entrent en collision et s'accrochent ensemble pour former des molécules, il se passe un phénomène identique. S'il en est ainsi, pourquoi n'a-t-on pas observé de telles réactions avant de les avoir provoquées ?

La réponse est donnée par les énergies nécessaires à mettre en jeu pour provoquer ces réactions.

Les réactions chimiques peuvent se produire à basse température, donc à basse énergie puisqu'elles sont nombreuses à se réaliser à température ambiante. Pour les réactions nucléaires, il en va tout autrement. En effet, les atomes sont électriquement neutres, car les charges des protons équilibrent les charges des électrons ; il n'y a donc pas de forces suffisamment énergiques pour empêcher les atomes d'entrer en contact. Les noyaux sont fortement chargés et ils sont tous chargés positivement. Ils se repoussent donc l'un l'autre très fortement, jusqu'à des distances de l'ordre de 10^{-12} cm. C'est à ces distances que les forces nucléaires deviennent importantes. Cette force de répulsion est considérable puisqu'on peut la comparer à celle qui serait nécessaire pour comprimer un barreau d'acier de la hauteur de la tour Eiffel jusqu'à une hauteur de... 3 cm.

Il faudra donc communiquer à un noyau (ou à la particule incidente) une énergie supérieure à cette énergie coulombienne ♦ pour qu'il puisse entrer en collision avec un autre noyau. Cette énergie sera l'énergie cinétique transmise au noyau « incident » à l'aide d'un accélérateur. Si cette énergie cinétique est suffisante, le noyau incident (particule α, par exemple) ira frapper le noyau « cible » et la réaction nucléaire pourra avoir lieu. Pour placer deux noyaux de fer à 10^{-12} cm l'un de l'autre, il est nécessaire de dépenser une énergie de 150 M*e*V. Les forces nucléaires agissent ensuite pour réaliser la réaction nucléaire qui libère d'ailleurs une énergie voisine de 150 M*e*V.

♦ Voir page 54.

C'est cette différence entre les énergies nécessaires pour réaliser les réactions chimiques et nucléaires qui explique que, si les premières ont pu être observées et provoquées depuis fort longtemps, les secondes n'existent pratiquement pas sur terre de manière spontanée (ou avec une vitesse de réaction si lente qu'il est difficile de les observer) en dehors des radioactivités.

Les réactions nucléaires sont donc provoquées par la collision d'un noyau projectile avec un noyau cible au repos (à l'agitation thermique près). L'énergie apportée par le bilan de la réaction Q se traduira donc comme la différence entre l'énergie cinétique des noyaux produits par la réaction et l'énergie cinétique des noyaux avant la réaction (essentiellement l'énergie cinétique du noyau incident).
Les noyaux produits par les réactions nucléaires perdent leur énergie par excitation et ionisation des atomes du milieu traversé et leur énergie apparaît sous forme de chaleur.
Il peut arriver qu'un noyau formé lors d'une réaction nucléaire se trouve dans un état « excité ». Cet excès d'énergie d'excitation est libéré sous forme de rayonnement γ et le noyau retombe à l'état fondamental.

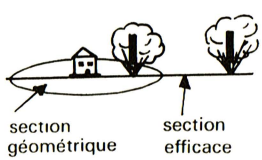
LA SECTION EFFICACE

Si on bombarde une cible contenant un certain nombre de noyaux cibles par un flux de particules (des protons accélérés, par exemple), on provoque un certain nombre de réactions nucléaires.
On s'aperçoit rapidement qu'avant d'avoir provoqué la réaction sur tous les noyaux cibles il faudra employer un nombre plus ou moins grand de projectiles incidents en fonction de plusieurs paramètres (la vitesse des projectiles, par exemple).
Il y a donc un aspect probabiliste de la réaction, qui est lié à la notion de section efficace (σ). C'est le rapport : nombre d'événements ♦ nucléaires d'un type donné par unités de temps et de surface, sur nombre de particules incidentes par unité de temps et de surface, multiplié par nombre de noyaux cibles par unité de surface.

♦ Collision, par exemple.

σ a la dimension d'une surface et s'exprime en « barns » (1 barn $= 10^{-24}$ cm).
Cette notion de section efficace est essentielle à la compréhension du mécanisme des réactions nucléaires.
La matière contient surtout... du vide. En effet, si les dimensions du noyau sont de l'ordre de 10^{-13} cm, il est séparé du noyau le plus proche de 10^{-8} cm. Quand on parle de « bombardement » des noyaux cibles par des noyaux (ou des particules incidentes), cela ressemble au bombardement militaire d'une ville où chaque maison serait éloignée de 500 km l'une de l'autre. On aurait alors peu de chances de toucher ces maisons. Il en serait autrement si chaque maison présentait une surface différente de la surface géométrique ♦, qui pourrait prendre des valeurs beaucoup plus grandes que celle-ci. On dirait alors que les maisons offrent aux bombes une section efficace, variable d'ailleurs avec la vitesse d'impact de la bombe dont certaines valeurs privilégiées donnent lieu à des « résonances » pour lesquelles la section efficace est plus grande. Il en va de même pour les réactions nucléaires, car à chaque type de réaction correspond

♦ On pourrait définir la « section efficace » d'une maison comme la surface à l'intérieur de laquelle doit tomber la bombe pour endommager cette maison. Cette section efficace dépend évidemment de la maison... et de la bombe.



une section efficace. Cette section efficace est d'autant plus grande que l'« attraction » du noyau pour le projectile est grande.

Si les noyaux cibles sont répartis sur une surface, σ = section efficace microscopique.

Si les noyaux cibles sont répartis dans un volume, on parle de ε = section efficace microscopique avec : $\varepsilon = \sigma\, p\, NA^{-1}$, où p = masse spécifique, A = masse atomique, N = nombre d'Avogadro ($= 6{,}02 \times 10^{23}$).

Lorsqu'un noyau cible est frappé par un projectile, il peut se passer plusieurs phénomènes. Chacun de ces phénomènes possède sa propre section efficace. C'est ainsi que l'on définit :

une section efficace de diffusion élastique σe *:* la diffusion élastique caractérise le choc d'une particule incidente sur un noyau où le noyau reste intact, la particule se contentant de rebondir sur lui ;

une section efficace de diffusion inélastique σin *:* dans la diffusion inélastique, le projectile pénètre dans le noyau cible et en ressort en laissant le noyau dans un état excité d'où il reviendra vers le niveau fondamental par émission γ ;

une section efficace de capture radioactive σc *:* cette section efficace σc est celle de la réaction (n, γ), c'est-à-dire qu'un noyau frappé par un neutron (n) l'absorbe et émet un rayonnement γ ;

une section efficace d'absorption (ou capture avec réaction) qui correspond, entre autres, aux réactions $(n, 2\,n)$, $(n, 3\,n)$ ou $(n\, f$ ♦), ce qui signifie :

♦ f = fission.

— qu'un neutron est absorbé par le noyau qui en émet ensuite 2 $(n, 2\,n)$ ou 3 $(n, 3\,n)$

— ou encore qu'un neutron est absorbé et qu'il y a fission du noyau (n, f) ;

la section efficace de capture avec fission, qui correspond à cette dernière réaction ;

la section efficace totale est la somme des sections efficaces partielles définies ci-dessus.

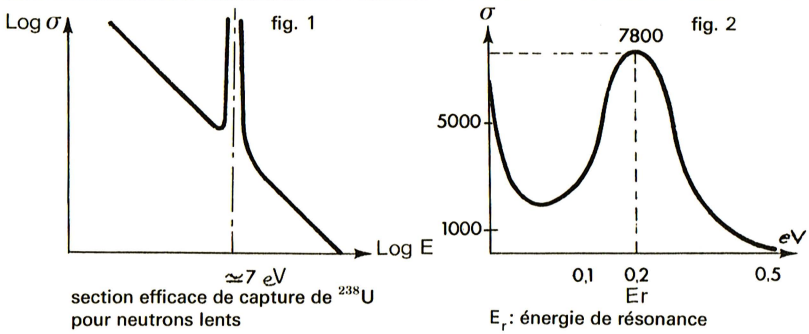
Variation de la section efficace σ avec l'énergie

Nous avons vu précédemment que la section efficace n'était pas une grandeur figée mais qu'elle dépendait, pour une réaction donnée, de l'énergie (donc de la vitesse) du noyau ou de la particule incidente. La réaction provoquée par des neutrons incidents est très intéressante, en ce sens que les neutrons, n'étant pas chargés électriquement, ne subissent pas l'action de la barrière du potentiel ♦ et peuvent assez facilement entrer en collision avec le noyau cible sans qu'il soit nécessaire de les accélérer (ce qui d'ailleurs serait impossible) ; c'est précisément ce type de réaction qui est utilisé dans les piles et les bombes atomiques. Si on trace l'évolution de la section efficace

♦ Voir page 51.

de capture de l'uranium 238 en fonction de la vitesse du neutron incident, on observe :
— que la section efficace est inversement proportionnelle à l'énergie (donc à la vitesse) du neutron incident ;
— qu'il existe une « résonance » pour E $\simeq$ 7 *e*V, c'est-à-dire une variation très brutale de σ qui passe alors par un maximum de plusieurs milliers de barns (fig. 1).

Pour la réaction (n, γ) du cadmiun, l'évolution de la section efficace en fonction de l'énergie à l'allure de la figure ci-dessous (fig. 2).



section efficace de capture de ^{238}U pour neutrons lents

E_r : énergie de résonance

La section efficace peut être comparée (très imparfaitement) au champ gravitationnel d'une planète. En effet, l'intensité de ce champ gravitationnel est inversement proportionnel à l'altitude et, par conséquent, la « vitesse de libération ♦ » est elle aussi inversement proportionnelle à l'altitude. Si un satellite artificiel pénètre dans le champ gravitationnel de la planète avec une vitesse V, il ne pourra graviter autour de la planète que si V est plus petit que la vitesse de libération. On voit donc que plus sa vitesse sera grande, plus il devra passer près de la planète ; autrement dit, le diamètre de la sphère (comprenant la planète) dans laquelle doit pénétrer le satellite pour qu'il puisse graviter autour de la planète est inversement proportionnel à la vitesse du satellite.

♦ Vitesse minimale communiquée à un véhicule spatial pour le libérer de l'attraction du corps céleste dont il est parti.

LES ÉNERGIES NUCLÉAIRES

Les énergies exploitables sont délivrées à partir de deux réactions particulières qui sont la fission et la fusion.

La fission

Par définition, la fission nucléaire est la coupure d'un noyau lourd en deux noyaux dont l'ordre de grandeur des masses est la moitié de la masse initiale.
Il peut arriver cependant que le noyau initial engendre trois et même

quatre noyaux. Ces modes de fission sont extrêmement rares. Lors de la fission, des particules (neutrons surtout) peuvent également être produites.

Modèle de la goutte d'eau

Tout comme les forces responsables de la tension superficielle tendent à maintenir une goutte d'eau sous une forme sphérique résistant aux déformations, les forces nucléaires sont censées maintenir le noyau sous une forme sphérique ; il faut fournir de l'énergie pour provoquer une déformation susceptible de conduire à la fission.
Si on cherche à scinder la goutte en deux parties en lui appliquant une force convenable, la goutte va passer par des étapes successives : la goutte, d'abord sphérique (*a*), se déforme, sous l'action de la force, en ellipse (*b*). Si la force de déformation est suffisante, la goutte continuera à se déformer et prendra la forme d'une haltère (*c*) puis se scindera (*d*) en deux gouttelettes prenant chacune une forme sphérique (*e*). Si, à chaque étape, l'énergie communiquée est insuffisante pour passer au stade suivant, la goutte revient vers la forme sphérique.

Dans la fission, la situation est analogue. Si un noyau a subi une certaine activation pour former un noyau composé (en se combinant, par exemple, avec un neutron), l'énergie reçue est alors égale à l'énergie de liaison L du neutron absorbé, plus son énergie cinétique. Le noyau subira une série d'oscillations et passera au stade *b*. Si le gain d'énergie est insuffisant pour franchir ce stade, le noyau reviendra, comme la goutte, vers la forme sphérique et l'énergie excédentaire se concentrera alors sur un ou plusieurs nucléons qui seront expulsés. Au contraire, si l'énergie est suffisante pour prendre la forme *c*, le retour à la forme sphérique devient très improbable, car la répulsion coulombienne ♦ commence à se faire sentir et elle peut s'opposer victorieusement au forces nucléaires qui, à ces distances, faiblissent considérablement. Le noyau prend alors la forme *d*, puis *e*, état de fission avec deux noyaux séparés se repoussant. Cette sorte de changement n'est possible que si elle s'accompagne d'un dégagement d'énergie. L'état *e* de ces deux noyaux séparés est alors plus stable que l'état initial *a*.

♦ Voir page 54.

Caractères généraux de la fission

Par définition, la fission d'un noyau L (noyau lourd) est représentée par la réaction $L \longrightarrow F_1 + F_2 + R$, où F_1 et F_2 sont les fragments de masse moyenne et R le reste (neutrons émis, rayonnement γ,

énergie cinétique communiquée aux fragments). Le noyau L qui subit la fission n'est pas le plus souvent le noyau initial, mais un noyau composé.
Deux cas remarquables peuvent cependant se présenter :
— *la fission spontanée* d'un noyau L. Elle se produit avec le thorium, l'uranium et les transuraniens (noyaux plus lourds que l'uranium). Sa probabilité d'existence est extrêmement faible.
— *la photofission* (fission provoquée par un photon γ) : L est alors un état excité du noyau initial L_0 :
$L_0 + \gamma \longrightarrow L \longrightarrow F_1 + F_2 + R$.
Ce mode de fission n'est un processus notable que pour des photons gamma dont l'énergie est d'au moins 5 MeV.
Dans tous les autres cas, L est un noyau composé fortement excité, provenant de la réaction sur un noyau initial I :
— *d'un neutron lent ou rapide :* une réaction de fission provoquée à l'aide de neutrons lents pourra toujours l'être avec des neutrons rapides. La réciproque est fausse. Cependant, il y a toujours lieu de considérer les sections efficaces de fissions et l'on voit alors que la probabilité de fission de l'uranium 235, par exemple, à l'aide de neutrons rapides est très faible.
— *d'une particule chargée :* une particule chargée positivement (un proton, par exemple) a plus de mal à former le noyau composé qu'un neutron. En effet, elle doit franchir la barrière du potentiel pour être admise dans le noyau ♦.

♦ Les substances utilisées dans les réacteurs atomiques : ^{236}U, ^{234}U, ^{240}Pu, sont appelées *substances fissiles*. Quant au noyau servant à la confection du noyau composé, il est appelé *substance fertile*.

Asymétrie

En général, on observe que la fission donne naissance à deux fragments dont les masses et les énergies cinétiques sont différentes.
Ainsi, la fission de l'uranium 236 (due à l'action d'un neutron sur l'uranium 235) donne le plus souvent (7 %) deux fragments dont les masses sont respectivement 96 et 140. On exprime cette propriété en disant que la fission est asymétrique.
Pour les hautes énergies, la fission tend à devenir symétrique.

Produits de fission

Les produits de fission sont instables. En effet, l'excès de neutrons par rapport aux protons, nécessaire pour assurer la cohésion des noyaux lourds, est bien plus grand que celui observé pour les noyaux moyens produits par la fission. L'émission de neutrons au cours de la fission ne suffit pas à résorber cet excédent ♦.
Les deux fragments vont donc à nouveau se désintégrer jusqu'à parvenir à l'état stable.
Dans un très petit nombre de cas ($\simeq$ 1/1 000), certaines étapes seront franchies par émission de neutrons : les neutrons retardés se manifestent avec la période caractéristique de la destruction du noyau dont ils sont issus.

♦ Par exemple, deux fragments possibles associés sont $^{95}_{39}Y$ (ythium) et $^{141}_{53}I$ (iode). Les isotopes stables correspondants sont ^{89}Y et ^{127}I. Il y a au total 20 neutrons excédentaires. Or l'émission instantanée lors de la fission est en moyenne de 2 à 3 neutrons.

Mais, dans presque tous les cas, la désintégration a lieu par radioactivité bêta négative (β^-). Cela correspond à la transformation d'un neutron en proton.
Ainsi, à chaque fragment de fission va correspondre une chaîne de produits de fission jusqu'à l'obtention d'un noyau stable ♦.
Le nombre total de radioéléments ainsi formé est de plusieurs centaines. Il faut mentionner, vu leur importance dans la théorie des réacteurs nucléaires ou piles, l'existence parmi les produits de fission de quelques noyaux extrêmement absorbants pour les neutrons : ce sont les poisons des piles.

♦ Par exemple :
$^{143}Xe \longrightarrow {}^{143}Cs$
$\longrightarrow {}^{143}Ba$
$\longrightarrow {}^{143}La$
$\longrightarrow {}^{143}Ce$
$\longrightarrow {}^{143}Pr$
$\longrightarrow {}^{143}Nd$
(Xe = xénon,
Cs = césium,
Ba = baryum,
La = lanthane,
Ce = cérium,
Pr = praséodyme,
Nd = néodyme)

Énergie libérée dans la fission

Cette énergie est de l'ordre de 200 M*e*V par noyau.
Une autre quantité d'énergie plus petite est dégagée au cours de la désintégration des fragments primaires.
L'énergie totale libérée apparaît sous diverses formes. La majeure partie est emportée par les deux fragments projetés à grande vitesse ($\simeq$ 167 + 2 M*e*V). La répartition se fait sensiblement avec 102 M*e*V pour le fragment léger et 65 M*e*V pour le lourd. Cette énergie est localisée à la fois dans le temps et dans l'espace (au voisinage du noyau d'uranium). Des neutrons (2,5 en moyenne) sont émis au moment de la fission, avec une énergie cinétique de 2,5 M*e*V ainsi que de γ instantané. Cette énergie est estimée à 5 M*e*V.
L'énergie émise par les produits de fission par leur radioactivité est voisine de 11 M*e*V répartis également entre les électrons β et les rayons γ qui accompagnent les transformations radioactives β.

Fission provoquée par réaction avec des neutrons lents ou en ralentissement

La section efficace de fission représente la probabilité de fission d'un noyau.
Les sections efficaces de fission pour les noyaux uranium 235, plutonium 239 et uranium 233 (noyaux subissant la fission avec une grande probabilité) pour des neutrons monocinétiques ♦ de 2 200 m/s sont données dans le tableau ci-après :

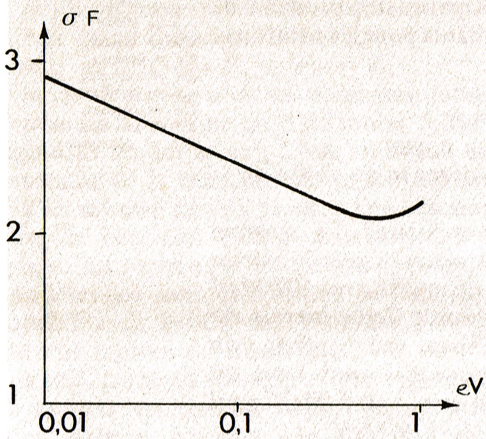
♦ Animés d'une vitesse unique.

	absorption (barns)	fission (barns)
^{233}U	593 ± 8	524 ± 8
^{235}U	698 ± 10	590 ± 15
^{239}Pu	1032 ± 15	729 ± 15

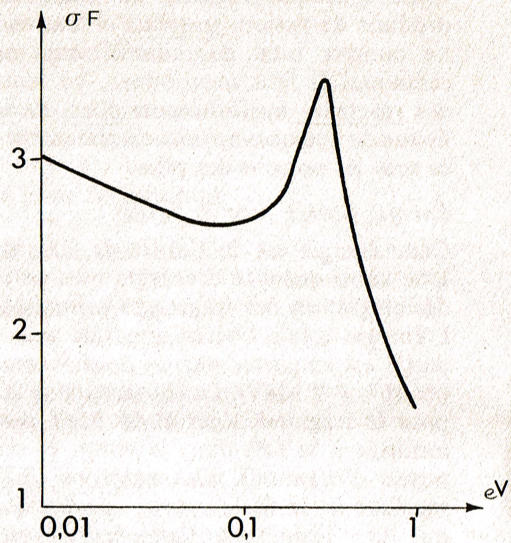
Les figures suivantes représentent l'évolution de la section efficace de fission en fonction de l'énergie du neutron incident. On peut noter particulièrement :

^{233}U : la section efficace évolue en $\frac{1}{v}$ (c'est-à-dire qu'elle est inversement proportionnelle à la vitesse du neutron incident).

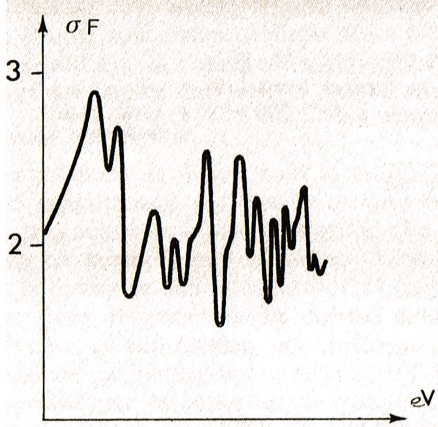
section efficace de capture avec fission
$_{92}U^{233}$ neutrons lents



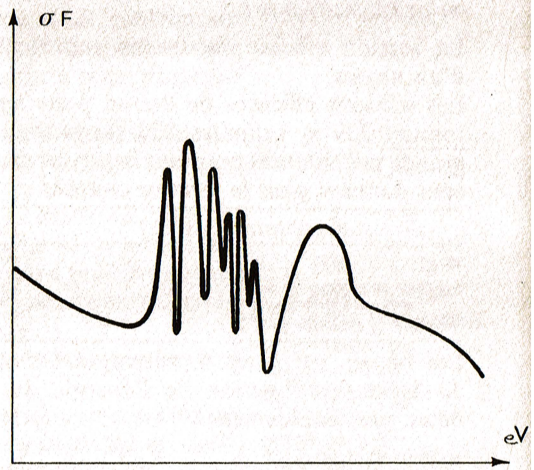
section efficace de capture avec fission
$_{94}Pu^{239}$ neutrons lents



section efficace de capture avec fission
$_{92}U^{233}$ neutrons thermiques



section efficace de capture avec fission
$_{94}Pu^{239}$ neutrons thermiques



^{235}U : la loi en $\frac{1}{v}$ n'est plus applicable dans la région thermique, mais l'écart reste faible.

^{239}Pu : la loi en $\frac{1}{v}$ ne s'applique plus du tout, car une résonance très intense est observée pour 0,297 *e*V. La seconde résonance positive se présente à 7.

Fission provoquée par des neutrons rapides

On appelle neutrons rapides ceux qui possèdent une énergie d'au moins 100 k*e*V. Elles sont encore notables ($\simeq$ 1 barn pour l'uranium 235 et 2 barns pour le plutonium 239 vers 1 M*e*V).

Neutrons produits dans la fission

Le nombre μ désigne le nombre moyen de neutrons émis lors de la fission ; il varie de 2,46 $\pm$ 0,15 pour l'uranium 233 à 2,98 $\pm$ 0,21 pour le plutonium 241. L'énergie de ces neutrons est représentée sur la figure ci-dessous :

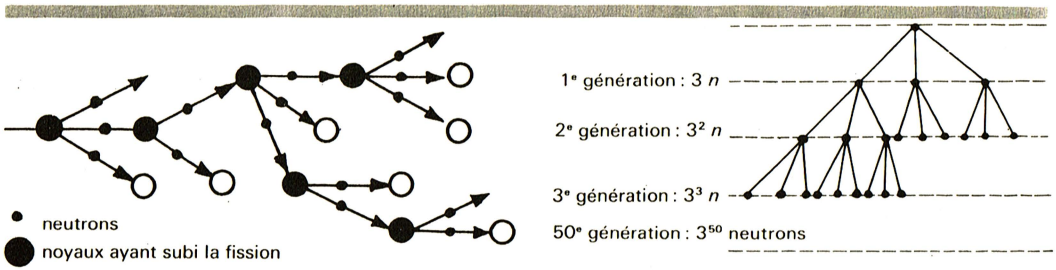
LES PILES ATOMIQUES

La réaction en chaîne

Les réacteurs nucléaires ou piles atomiques sont des appareils comportant essentiellement une substance fissible, telle que l'uranium 235 dont des noyaux fissionnent sous l'action d'un flux de neutrons et engendrent au cours de ces fissions d'autres neutrons en nombre et qualité suffisante pour engendrer de nouvelles fissions.

Lorsqu'un neutron est capturé par un noyau d'uranium 235 et qu'il en provoque la fission, celle-ci s'accompagne de l'émission de 2 ou 3 neutrons (2,5 en moyenne).

Ces neutrons connaissent des sorts divers. Certains traversent la masse de matière et s'échappent, d'autres sont capturés sans provoquer de fission, d'autres encore sont capturés et provoquent des fissions en même temps que l'émission d'autres neutrons.



Coefficient de multiplication

Si un neutron, en provoquant une fission, permettait l'émission de 3 neutrons dont chacun fissionnerait à son tour un atome en libérant 3 neutrons et ainsi de suite, on pourrait aisément calculer le nombre de neutrons de chacune des « générations ».

La cinquantième génération serait atteinte en 50×10^{-2} secondes (ce qui est le cas d'une bombe atomique). En réalité, une partie seulement des neutrons de la nième génération provoque des fissions et l'émission des neutrons de la nième + 1 génération. Néanmoins, si les pertes de neutrons ne sont pas excessives, on peut réaliser une réaction en chaîne qui peut conduire, le cas échéant, à une explosion. Si on parvient à maîtriser la cadence de libération de l'énergie (donc des fissions) et à la plier aux besoins d'une utilisation contrôlable dans le temps, on obtient une pile atomique.

Le réacteur nucléaire est un système comprenant une matière fissible en quantité suffisante disposée de façon à pouvoir entretenir une réaction en chaîne contrôlable. Il suffit pour cela que la production des neutrons issue des fissions soit égale à la disparition des neutrons.

Cette condition minimale se traduit en disant que, pour chaque noyau subissant la fission, il faut qu'il soit produit, en moyenne, un neutron qui induise une autre fission. Cette condition s'exprime par le coefficient de multiplication k du réacteur :

$$k = k\infty \blacklozenge = \frac{\text{nombre de neutrons de la génération } n^{-1}}{\text{nombre de neutrons de la génération } n};$$

◆ $k\infty$ = coefficient de multiplication d'un milieu infini.

Si k est inférieur à 1, la réaction en chaîne ne pourra pas se réaliser ou s'entretenir.

Si k est égal à 1, la réaction se réalise ou s'entretient à vitesse constante.

Si k est supérieur à 1, la réaction est « divergente », la vitesse est croissante et, si cela dure trop longtemps, le réacteur peut finir par exploser.

Taille critique

Dans un réacteur, les dimensions sont finies et une certaine partie des neutrons s'échappe. Cela explique que dans un réacteur,

k ne sera $\geqslant 1$ que si les dimensions de la pile sont supérieures à une valeur limite « taille critique ». Il sera donc impossible de réaliser une réaction en chaîne avec une très petite quantité de substance fissible.

Ralentissement des neutrons

L'uranium naturel qui peut être utilisé comme « combustible » dans une pile atomique se compose de 99,3 % d'uranium 238 et de 0,7 % d'uranium 235.

On a vu précédemment que seul l'uranium 235 était fissible par des neutrons thermiques ♦ et que la section efficace de fission de l'uranium 235 était beaucoup plus grande que celle de l'uranium 238 pour les neutrons rapides (seuls capables de produire la fission pour l'uranium 238).

♦ Neutrons thermiques ou neutrons lents.

Or les neutrons libérés par la fission possèdent des énergies de l'ordre de 1 à 2 M*e*V. On est donc obligé de ramener l'énergie de ces neutrons vers les énergies thermiques (correspondant à des vitesses $\simeq$ 2 200 m/s).

On dispose alors dans le réacteur un matériau, dit modérateur, qui va réduire la vitesse des neutrons par chocs élastiques. On utilise par exemple le graphite et l'eau lourde. Il faut noter que le modérateur présente une section efficace de capture. Bien qu'étant très petite, cette section efficace de capture n'est cependant pas nulle et il faut en tenir compte dans le bilan neutronique pour le calcul du coefficient k.

Pile homogène et pile hétérogène

Dans tout ce qui a été dit précédemment, il était admis que le réacteur était homogène, c'est-à-dire que le combustible et le modérateur étaient intimement liés et répartis de manière homogène.

Ce système présente un inconvénient grave. En effet, l'uranium 238 possède une section efficace de capture sans fission qui présente une importante résonance dans la zone de 6 *e*V et d'autres résonances moins fortes dans la zone de 100 *e*V. Or, dans le processus de ralentissement, l'énergie des neutrons passe obligatoirement par ces zones. Il y aura donc une grande perte de neutrons et le coefficient k risque de ne pas pouvoir devenir égal ou supérieur à 1.

La difficulté peut être levée en organisant le réacteur de façon « hétérogène », c'est-à-dire en séparant le combustible du modérateur. L'uranium sous forme de barre est, par exemple, placé au sein du modérateur. Les neutrons rapides quittent presque aussitôt le bloc d'uranium. Ils vont subir le ralentissement dans le modérateur. Une fois portés au niveau thermique, ils diffuseront autour du modérateur ; s'il ne sont pas capturés par des impuretés, s'ils ne s'évadent pas du réacteur et s'ils ne sont pas absorbés par le réflecteur (en graphite, par exemple), ils retourneront tôt ou tard dans l'uranium

où ils pourront provoquer une fission. La capture sans fission ne sera pas entièrement éliminée, mais ramenée à un niveau compatible avec le fonctionnement du réacteur.

Pour les réacteurs primaires, on utilise l'uranium naturel, mélange d'uranium 238 et d'uranium 235 ♦. Pour la réaction explosive, il est nécessaire d'utiliser de l'uranium très enrichi en uranium 236 ou du plutonium 239 ♦.

♦ La quantité d'uranium varie d'une pile à l'autre, elle peut passer de quelques kilos à plusieurs tonnes.

♦ Celui-ci, inconnu dans la nature, peut être produit dans les piles :

$$^{238}U + {}^{1}n \text{ (neutron)} \longrightarrow {}^{239}U + \gamma$$

$$\downarrow \beta^-$$

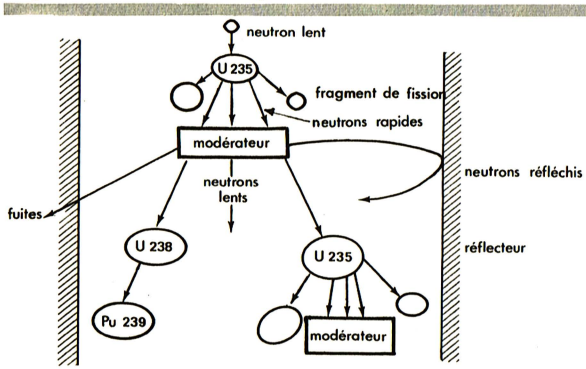
$$^{239}Np + \gamma \text{ (période : 23,5 minutes)}$$

$$\downarrow \beta^-$$

$$^{239}Pu \text{ (période : 2,3 jours).}$$

Les réacteurs sont entourés d'un réflecteur pour éviter la fuite des neutrons produits près des parois. Ce réflecteur se caractérise par une grande section efficace de diffusion et une très faible section efficace de capture. La qualité du réflecteur s'exprime par l'« Albedo », qui est un coefficient réprésentant le rapport entre le nombre de neutrons pénétrant dans le réflecteur et ceux qui en sortent. Ainsi, pour une épaisseur de 40 cm, l'eau lourde présente un Albedo de 0,968.

La figure ci-dessous représente la fission de l'uranium 235 et la capture des neutrons par l'uranium 238 dans un réacteur nucléaire.



Classification des piles

Les piles à neutrons rapides possèdent peu (ou pas) de modérateurs. Les neutrons ne subissent pratiquement pas de ralentissement entre leur émission au cours d'une fission et la fission qu'ils provoquent.

Les piles à neutrons thermiques sont celles où les neutrons sont ralentis au maximum à l'aide de modérateur.

Les réacteurs régénérateurs

Nous avons vu que la fission d'un noyau d'uranium 235 peut donner naissance, par l'intermédiaire d'un noyau d'uranium 238 ♦, à un noyau de plutonium 239. Or celui-ci est fissible. Au fur et à mesure donc que l'uranium 235 est consommé naissent des noyaux de plutonium 239.

♦ Voir figure ci-dessus.

Si un tel réacteur régénérait la même quantité de plutonium 239 qu'il perd par fission d'uranium 235 (il aurait un rendement de 1), la quantité de matériau fissible resterait constante.

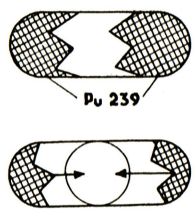
Un réacteur surgénérateur produirait plus de noyaux fissibles qu'il n'en consomme (non immédiatement réutilisés dans le même réacteur).

Contrôle des réacteurs nucléaires

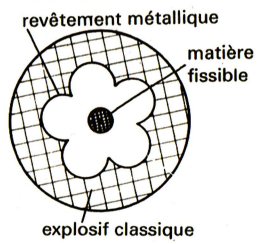
Le contrôle de la réactivité d'un réacteur à neutrons thermiques s'effectue à l'aide de barres ou de plaques de matériau absorbants pour les neutrons lents (grande section efficace de capture) : cadmium, bore, hafnium... Ces barres sont plongées dans le modérateur et créent une dépression dans le flux neutronique qui dépend de la position de la barre.
Pour les piles à neutrons rapides, les barres de cadmium sont inefficaces (leur grande section efficace de capture est située dans les régions thermiques). La réactivité est alors contrôlée par le réflecteur qui est éloigné ou rapproché du « cœur » de la pile.

LES BOMBES ATOMIQUES

Contrairement à ce qui se passe dans un réacteur nucléaire, on cherche dans une bombe atomique à faire monter au maximum le coefficient multiplicateur k. On obtient ainsi une réaction en chaîne divergente, ce qui permet de fissionner très rapidement les noyaux de matière fissible et de dégager presque instantanément une énorme énergie, et c'est l'explosion.
Le plutonium 239 est fréquemment utilisé, car il est fissible par les neutrons rapides (ce qui évite la présence d'un modérateur lourd et encombrant dans la bombe).
Le schéma classique de la bombe atomique est le suivant. Le plutonium 239 est organisé en deux masses sous-critiques, éloignées l'une de l'autre. Dans cette position, il n'y a aucun risque d'explosion puisque aucune réaction en chaîne divergente ne peut naître au sein d'une masse fissible inférieure à la masse critique.
Au moment voulu les deux masses sous-critiques sont précipitées l'une contre l'autre. Elles sont dessinées de façon à réaliser alors une masse sur-critique. La réaction en chaîne se développe alors presque immédiatement. Dès les premières fissions, les deux demi-masses ont tendance à se séparer et il est nécessaire de les maintenir l'une contre l'autre pour éviter cette expansion prématurée. Selon que la masse critique aura été réalisée plus ou moins longtemps, la puissance développée par la bombe sera plus ou moins grande. Une technique plus récente consiste à entourer une quantité de matière fissible par un imploseur ♦ classique.



♦ Imploseur : dispositif provoquant une explosion « vers l'intérieur ». L'explosif classique permet en déformant le revêtement métallique de comprimer la matière fissible.

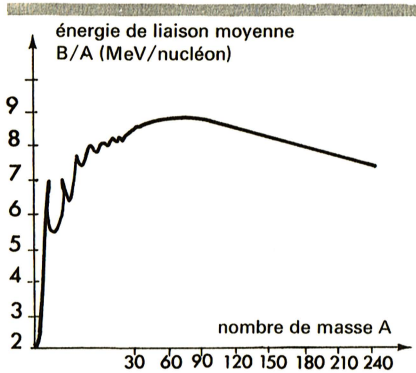


La matière fissible est présente sous une forme « diluée ». Lorsque l'imploseur est mis à feu, il forme une onde de détonation qui déforme le revêtement métallique, qui à son tour comprime totalement la matière fissible qui peut alors subir la fission.

LA FUSION

Généralités

La fusion thermonucléaire est la principale source d'énergie de notre univers puisqu'elle se rencontre dans les étoiles et notamment dans le Soleil. L'examen de la courbe $\overline{L}$ (A) donnant l'énergie de liaison moyenne par nucléon en fonction du nombre atomique A montre qu'il existe un maximum voisin de 8,5 M*e*V pour les corps d'un nombre de masse A $\simeq$ 40. Si, contrairement à la fission (qui consiste à scinder en deux des noyaux lourds pour que $\overline{L}$ croisse en remontant la courbe de droite à gauche), on fait « fusionner » deux atomes légers, $\overline{L}$ va croître en remontant la courbe de gauche à droite.



Un simple coup d'œil à cette courbe montre l'intérêt de la fusion : la pente de la courbe de $\overline{L}$ (A) est bien plus grande à gauche de A qu'à droite, ce qui signifie que l'énergie libérée, par nucléon, sera plus grande dans une réaction de fusion que dans une réaction de fission. En effet, il semble qu'en « soudant » ensemble 40 nucléons on puisse obtenir une énergie de plus de 8 M*e*V par unité de masse atomique (*u.m.a*) mise en jeu, alors que la fission d'un noyau lourd (A $\simeq$ 240) libère, comme nous l'avons vu, moins de 200 M*e*V, soit à peine 0,8 M*e*V par *u.m.a.*

Les difficultés considérables (dues à la barrière du potentiel) qui s'opposent à la formation de noyaux de nombre atomique A élevé font qu'en pratique on n'envisage pas d'obtenir des noyaux pour lesquels A serait supérieur à 8 ou 10. Actuellement, on tente de faire fusionner les isotopes de l'hydrogène pour obtenir des noyaux de A égal à 3 ou 4.

Les réactions de fusion ♦

♦ Voir l'article: la Physique des plasmas, pages 474 à 477.

Il faut tout d'abord noter que, contrairement à la fission, il n'existe pas de réaction en chaîne de fusion. Cela est évidemment un grave handicap à l'utilisation « lente » de l'énergie thermonucléaire.

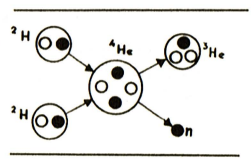
Les réactions de fusion sont peu nombreuses. La plus typique est celle du deutérium (le deutérium est l'isotope $^{2}_{1}H$ de l'hydrogène ^{1}H). Elle est représentée par la formule $^{2}H + {}^{2}H \longrightarrow {}^{3}H + n$ (neutron) + 3,2 M*e*V.
Les noyaux légers dont l'énergie de liaison $\overline{L}$ varie rapidement et qui sont susceptibles de subir la fusion sont les suivants :

— *Les trois isotopes* ♦ *de l'hydrogène :* ♦ Voir page 47.
^{1}H : hydrogène ordinaire.
^{2}H : deutérium ou hydrogène lourd = *d*. Il comporte un neutron et un proton assez faiblement liés (2,2 M*e*V). Il en existe une proportion de 1/6 000 dans l'hydrogène naturel. Sa combinaison avec l'oxygène donne l'eau lourde : D_2O.
^{3}H : tritium (T) formé d'un proton et de 2 neutrons. Il en existe 5×10^{-18} dans l'eau de pluie.

— *Deux isotopes de l'hélium :*
^{3}He: proportion = 1/1 000 dans l'hélium naturel.
^{4}He : hélium naturel. Son noyau, très stable, forme la particule α.

— *Deux isotopes du lithium :*
^{6}Li et ^{7}Li, ce dernier étant le plus abondant.

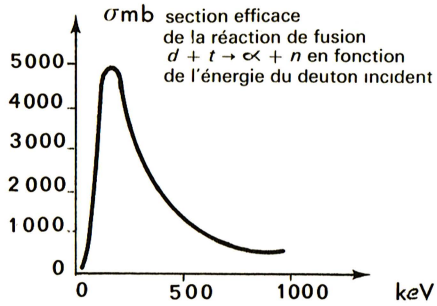
Les réactions nucléaires de fusion se produisent, comme pour la fission, par neutrons lents avec création d'un « noyau composé » très éphémère. Ce noyau se scinde immédiatement et l'énergie dégagée apparaît sous forme d'énergie cinétique emportée par les fragments du noyau intermédiaire. Dans la réaction $^{2}H + {}^{2}H \longrightarrow {}^{3}H + n$ + 3,2 M*e*V, les deux noyaux de deutérium forment un noyau d'hélium 4 qui se décompose en un noyau d'hélium 3 et un neutron.



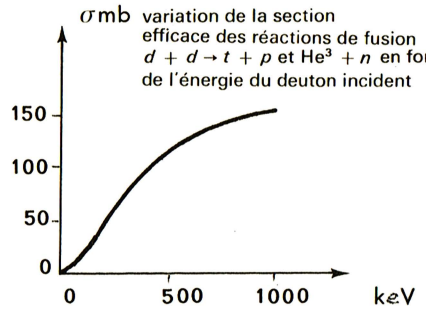
On peut ainsi dresser une liste des réactions de fusion possibles pour les premiers noyaux :
$D + D \longrightarrow T + P + 4{,}0$ M*e*V ;
$D + D \longrightarrow {}^{3}He + n + 3{,}2$ M*e*V ;
$D + T \longrightarrow \alpha + n + 17{,}6$ M*e*V ;
$D + {}^{3}He \longrightarrow \alpha + P + 18{,}4$ M*e*V ;
${}^{6}Li + n \longrightarrow \alpha + T + 4{,}8$ M*e*V ;
${}^{6}Li + P \longrightarrow \alpha + {}^{3}He + 3{,}9$ M*e*V ;
${}^{6}Li + D \longrightarrow \alpha + \alpha + 22{,}3$ M*e*V.
Les trois premières réactions intéressent surtout la fusion contrôlée, et la dernière est indirectement utilisée dans la bombe thermonucléaire.

Les sections efficaces de fusion

Nous avons vu ♦ que le principal obstacle à la réalisation des réactions de fusion est la répulsion coulombienne (ou barrière de potentiel) ♦ Voir page 51.



σmb section efficace de la réaction de fusion $d + t \rightarrow \alpha + n$ en fonction de l'énergie du deuton incident



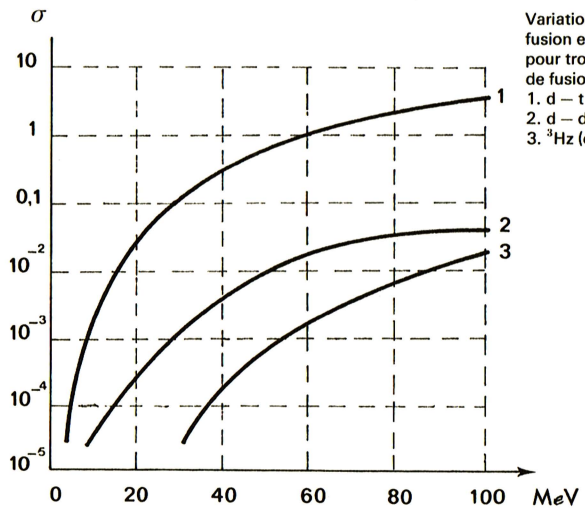
σmb variation de la section efficace des réactions de fusion $d + d \rightarrow t + p$ et $He^3 + n$ en fonction de l'énergie du deuton incident

qu'exercent les noyaux entre eux. Cette barrière est d'autant plus élevée que le numéro atomique du noyau est lui-même élevé. D'où l'intérêt d'opérer avec des noyaux légers. La hauteur B de la barrière de potentiel est d'environ :

0,5 MeV pour un proton « au contact » d'un noyau ;
0,76 MeV pour un deutérium heurtant un autre D ;
0,68 MeV pour D heurtant T ;
1,25 MeV pour D heurtant ^{6}Li.

Pour la radioactivité α comme pour la fission, cette barrière peut être franchie par « effet tunnel ♦ » avec une probabilité qui croît avec la vitesse des particules (tant que leur énergie reste inférieure à la hauteur de la barrière, la probabilité étant égale à 1), quand leur énergie est supérieure à la hauteur de la barrière. Comme pour les réactions nucléaires de fusion, cette probabilité qualifie la « section

♦ Voir note page 50.



Variation des sections efficaces de fusion en fonction de l'énergie pour trois réactions de fusion.
1. d – t : t (d, n)$_4$,, He
2. d – d : d (d, p) t + d (d, n)$_3$,, He
3. ^{3}Hz (d, p)^4,, He

efficace de fusion ». Cette section efficace présente un maximum de l'ordre de un barn pour une énergie d'environ 0,1 M*e*V pour les deutons (ou deutérium).

UTILISATION DE L'ÉNERGIE THERMONUCLÉAIRE

Pour donner aux particules l'énergie nécessaire pour franchir la barrière du potentiel, le seul moyen connu actuellement est de leur communiquer cette énergie sous forme de chaleur. En effet, la chaleur représente l'agitation des atomes et il existe une relation entre la température et l'énergie : $E = k\ T$, où $k = 0{,}87.10^{-4}$ *e*V. Donc 1 k*e*V correspond à 10 millions de degrés C. L'examen des courbes des sections efficaces montre qu'il est nécessaire d'obtenir une énergie de l'ordre de 100 k*e*V pour que la probabilité de fission soit élevée. Cela correspond donc à une température de 1 milliard de degrés. En fait, les réactions de fusion peuvent être observées à plus basse température (de l'ordre de plusieurs centaines de millions de degrés). Ces hautes températures peuvent être atteintes au sein de « plasmas » (gaz ionisés) « comprimés » à l'aide de champs magnétiques considérables ou à l'aide d'une bombe atomique : c'est le cas de la bombe H (à hydrogène) où une bombe A sert d'« allumette » pour amorcer la réaction de fusion.
Ainsi la bombe thermonucléaire au lithium se comporte de la façon suivante :
Le combustible est essentiellement du deutérium et du lithium 6. Le lithium joue le rôle de producteur de tritium (très rare à l'état naturel). Sous l'action des neutrons de la bombe A, la réaction $^6Li + n \longrightarrow \alpha + T$ entre en jeu. Le tritium ainsi formé fusionne avec les deutons : $D + T \longrightarrow \alpha + n$, créant d'autres neutrons qui, à leur tour, reforment du tritium sur d'autres lithium 6. La somme des deux réactions est équivalente à la réaction $^6Li + D \longrightarrow \alpha + \alpha + 22{,}3$ M*e*V.
Les hautes températures exigées pour amorcer une réaction de fusion n'ont pas permis jusqu'ici la création nucléaire à fusion. Seuls des équipements expérimentaux ont été construits, grâce auxquels il a pu être effectué quelques fusions, mais avec un rendement très inférieur à 1.
L'utilisation de cette énergie de fusion est cependant beaucoup plus intéressante que celle issue de la fission. Elle présente en effet les avantages suivants :
— l'énergie libérée est $\simeq$ 10 fois plus grande (par *u.m.a.*) ;
— les noyaux capables de subir la fusion sont plus abondants que ceux capables de fissionner. Leur extraction est beaucoup plus aisée. La réaction ne produit pas de déchets radioactifs.

Patrick Golicki.

AUTOMATION (Automation) pages 97, 169, 223, 245, 259, 450.

Ensemble des techniques permettant de substituer à la commande manuelle des mécanismes une commande automatique, suivant un programme déterminé ♦. Par exemple, la mise en marche d'un navire moderne exige une série de manœuvres à effectuer dans un ordre fixé : mise en marche des moteurs des génératrices, mise sous tension de différents circuits, mise en route des moteurs principaux, etc. Tout cela est, de plus en plus, confié à un système de commande automatique où l'homme n'a plus qu'un rôle de contrôle.

♦ Voir Feed-back et Cybernétique.

AVOGADRO (Amedeo) pages 26, 33.

Physicien et chimiste italien, né à Turin en 1776, mort en 1856.
Universellement célèbre par la loi et le nombre auxquels il laissa son nom, Avogadro est parfois oublié en tant qu'homme. Jeune noble italien, il commence sa carrière par des études de droit. Après quelques années d'exercice comme avocat, il décide à vingt-six ans de tout abandonner pour se consacrer entièrement à la recherche scientifique. Il gravit alors peu à peu les échelons universitaires et, vingt ans plus tard, est nommé professeur de physique supérieure à l'université de Turin. Au cours de cette période, il publie son célèbre mémoire, « Essai sur le moyen de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires ». Dans cet ouvrage, il émet l'hypothèse selon laquelle des gaz différents pris en volumes égaux, dans les mêmes conditions de température et de pression, contiennent le même nombre de molécules. Si cette découverte demeure une des bases de la chimie, son importance n'apparut qu'un demi-siècle plus tard.
De son vivant, Avogadro fut, certes, fort estimé en tant que professeur, mais plus ou moins ignoré en tant que savant.

Ouvrages essentiels :
Fisica dé corpi ponderabili, ossia trattato della costituzione, generale de corpi (Stamp. Reale, Turin, 1873) ;
Mémoires (Gauthier-Villars, Paris, 1938).

AVOGADRO (nombre d') (Avogadro's constant)

Le nombre d'Avogadro est le nombre de molécules contenues dans une mole de gaz et, par extension, de tout corps pur. Il vaut $6{,}023 \times 10^{23}$.

B

BARYON ♦ (Baryon) pages 275, 353, 413, 438, 439, 440.

♦ Se reporter à l'article : la physique des hautes énergies : les Particules.

Particule de masse égale ou supérieure à celle du proton. On trouvera dans les baryons les particules suivantes :

nucléons { protons (charge +) / neutrons (charge 0)

hypérons { Λ^o / Σ^+ Σ^- Σ^o / Ξ^- et Ξ^o

Il faut ajouter à ces particules les antiparticules correspondantes, de charge électrique et autres caractéristiques opposées.

BASE (Base) pages 23, 88, 125, 204.

Substance caractérisée par un certain nombre de propriétés chimiques :
— action sur des indicateurs colorés ;
— neutralisation par un acide avec formation d'un sel.
Il est intéressant d'étudier les bases par comparaison avec les acides. Pour Svante Arrhenius, une base est une substance qui, en solution dans l'eau, émet des ions $(OH)^-$, la neutralisation par un acide n'étant pas autre chose que la recombinaison de ces ions avec les ions H^+ de l'acide.
Dans la théorie de Brönsted, une base est un accepteur de protons (sans préciser le solvant) ♦. On voit la différence entre ces 2 théories sur un exemple :

♦ Voir Acide.

— Pour Arrhenius, la soude NaOH est une base : dans l'eau, elle s'ionise conformément à la réaction :

$$NaOH \longrightarrow Na^+ + OH^-$$

— Pour Brönsted : c'est $(OH)^-$ qui est la base, car elle accepte le proton pour donner de l'eau :

$$(OH)^- + H^+ \longrightarrow H_2O.$$

Une base selon Brönsted peut être soit une molécule : NH_3 (ammoniac), par exemple, soit un ion : Cl^- (chlorure).
En fait, Brönsted ne considère pas acide et base séparément, mais les couples acide-base conjuguée ♦, par exemple :

♦ La base conjuguée est le corps qui est constitué par ce qui reste de la molécule d'acide lorsqu'elle a émis un proton.

— l'acide chlorhydrique HCl a pour base conjuguée Cl^- ;
— l'ion ammonium NH_4^+ a pour base conjuguée NH_3, l'ammoniaque.
On retrouve ici la généralisation de Lewis pour les acides ♦ ; une base de Lewis est un donneur de doublet électronique : l'ion Cl^-, par exemple, fournit un doublet électronique au proton H^+ pour former HCl.

♦ Voir Acide.

La force d'une base se définit comme celle d'un acide. Les définitions de constantes de basicité K_B et du p_{K_B} sont analogues à celles qui ont été données pour un acide.

BECQUEREL (Henri) pages 57, 167, 168, 487, 529.

Henri Becquerel (*Viollet*).

Physicien français, né à Paris en 1852, mort au Croisic en 1908.
Issu d'une dynastie d'éminents physiciens, Henri Becquerel sort de l'École polytechnique et de l'École des ponts et chaussées pour succéder à son père comme professeur de physique au Muséum d'histoire naturelle. Ses recherches le mènent à la grande découverte de la radioactivité des sels d'uranium en 1896. En analysant des rayons émis par l'uranium à température ordinaire, il établit que ce dernier émet des rayons comparables à ceux de Röngten : ils affectent une plaque photographique en passant à travers de minces plaques de métal. Becquerel déduit de l'étude de ces rayons que la radioactivité est une propriété de l'atome d'uranium et de tous ses composés. A la suite de ces travaux, il reçoit avec Pierre et Marie Curie le prix Nobel de physique en 1903.
On doit également à Becquerel la découverte du phénomène d'ionisation des gaz, ainsi que de nombreuses recherches sur le magnétisme, sur la phosphorescence, sur la polarisation de la lumière et sur l'absorption de cette dernière par les cristaux.

Ouvrage essentiel :
Recherche sur l'absorption de la lumière (Gauthier-Villars, Paris, 1888).

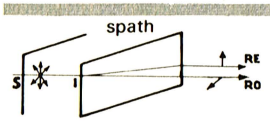
BERZELIUS (Jöns Jacob) page 94.

Né en 1779, mort en 1848.
Chimiste suédois, un des créateurs de la chimie moderne et de la notation chimique par symboles.

BIRÉFRINGENCE ♦ (Birefringence) pages 320, 399, 403, 481.

♦ Pour plus de précisions, lire l'article : l'Optique, pages 399 et 400.

Phénomène qui se produit lorsqu'un pinceau de lumière rencontre un cristal comme le spath d'Islande (carbonate de calcium). On observe alors à la sortie du cristal deux pinceaux émergents (le phénomène est également connu sous le nom de double réfraction). En observant un objet au travers d'un spath, on voit deux images de cet objet. Et, si l'on fait tourner le spath, l'une des images tourne autour de l'autre :



RO : rayon ordinaire polarisé dans le plan de la figure.

RE : rayon extraordinaire polarisé perpendiculairement au plan de la figure.

— le rayon émergent RO (rayon ordinaire) ne subit pas de déviation lorsque SI est perpendiculaire à la face d'entrée,
— le rayon RE (rayon extraordinaire) a subi une déviation.
On constate de plus que ces rayons sont polarisés : si le rayon SI est formé de lumière naturelle, c'est-à-dire si les vecteurs champ électrique de la vibration lumineuse (vecteur vibration) peuvent prendre toutes les directions d'un plan perpendiculaire à SI, les rayons RO et RE correspondent à des vecteurs vibration respectivement perpendiculaires et parallèles au plan de la figure. La lumière est dite polarisée rectilignement.

BOHR (atome de) : voir l'article : l'Atome pages 35 à 38.

BOHR (Niels) pages 33, 35 à 38, 109 110, 276, 289, 319, 334, 346, 355, 500.

(Viollet).
Niels Bohr

Physicien danois, né à Copenhague en 1885, mort en 1962.
Docteur ès sciences de l'université de Copenhague, Bohr entreprend des travaux de recherches en Angleterre, sous la direction de J. J. Thomson à Cavendish, de sir Rutherford à Manchester. De retour dans son pays, il développe concurremment ses recherches en physique théorique et sa carrière universitaire. Il reçoit le prix Nobel de physique en 1922. S'étant enfui du Danemark pendant la Seconde Guerre mondiale, il séjourne quelques années aux États-Unis, puis revient à Copenhague d'où il ne cesse d'exercer une influence mondiale sur la physique nouvelle, tant par ses écrits que par la suite pratiquement ininterrompue de ses travaux.

Appartenant à la lignée des grands pionniers de la théorie des quanta, Bohr est universellement reconnu comme l'un des savants les plus doués de son temps. Sa principale contribution à la physique moderne est son interprétation du spectre dans la théorie des quanta. Tout jeune encore, il lance une hypothèse particulièrement audacieuse et fructueuse sur la structure et sur la genèse de l'atome, introduisant la quantification de l'énergie des électrons et la notion d'un moment magnétique élémentaire, le « magnéton de Bohr ». Une grande partie des travaux atomiques modernes reposent sur cette théorie.
Les travaux ultérieurs de Bohr s'attachent, d'une part, au développement de son hypothèse fondamentale et, d'autre part, à l'étude du noyau de l'atome. Il analyse ainsi la cohésion du noyau atomique et propose le modèle de la « goutte liquide » pour expliquer les phénomènes de désintégration nucléaire. Se penchant à la fin de sa vie sur les problèmes de la mécanique ondulatoire et quantique, il met en évidence la complémentarité des ondes et des corpuscules en mouvement.

Ouvrages essentiels :
Les Spectres et la structure de l'atome (Hermann, Paris, 1923).
La Théorie atomique et la description des phénomènes (Gauthier-Villars, Paris, 1932).
Quantum d'action et noyaux atomiques (Hermann, Paris, 1939).
Physique atomique et connaissance humaine (Gauthier-Villars, Paris, 1961).

BOLTZMANN (Ludwig) page 509.

Physicien autrichien, né à Vienne en 1844, mort à Duino, près de Trieste, en 1906. Successivement professeur de mathématiques, de physique expérimentale et de physique théorique dans plusieurs grandes université autrichiennes et allemandes, Boltzmann est célèbre pour ses travaux sur la théorie cinétique des gaz. Son œuvre est toutefois beaucoup plus vaste et on lui doit de remarquables apports dans plusieurs branches de la physique.

Ses premières recherches le portent à analyser la seconde loi de la thermodynamique sous l'angle de la théorie atomique de la matière. Introduisant la théorie de la probabilité dans les lois mécaniques régissant les mouvements des atomes, il en déduit la notion d'entropie. Il pose par ailleurs les premiers fondements de la mécanique statistique et démontre la loi de répartition de la vitesse des molécules. L'un des premiers Européens à défendre puis à approfondir la théorie de l'électromagnétisme de J. C. Maxwell, Boltzmann, d'autre part, applique en thermodynamique la loi de Stefan sur le rayonnement des corps noirs.

Malade, voyant ses idées violemment controversées, ses exposés incompris, Boltzmann se suicide à soixante-deux ans, alors que commencent en physique atomique les travaux qui remettront à l'honneur ses propres découvertes.

Ouvrage essentiel :
Leçons sur la théorie des gaz (Gauthier-Villars, Paris, 1902).

BOLTZMANN (Loi de) : voir Corps noir et les pages 143, 500, 515.

BOMBARDEMENT ♦ (Bombardment) pages 64, 66, 133, 166, 209, 210, 229, 235, 259, 275, 314, 497, 499

Expression imagée qui désigne l'envoi d'un flux de particules sur une substance (appelée cible).
Les particules peuvent être des électrons, des neutrons, des protons, ou des ions plus lourds (particules α, par exemple).

♦ Pour plus de précisions, lire l'article : les Particules, pages 420 et 421, et l'article : la Physique des plasmas, page 475.

BOMBE (Bomb) pages 44, 79, 259, 260, 263, 269, 270, 275, 324, 337, 359, 492, 498.

Bombe A ♦ (atomique, ou nucléaire)
La bombe d'Hiroshima et de Nagasaki. L'effet explosif est produit par la fission en chaîne d'une masse suffisante (masse critique) d'uranium 235 ou de plutonium 239. La mise à feu est produite par une charge de poudre projetant les deux moitiés de la charge nucléaire l'une contre l'autre et réalisant une masse supérieure à la masse critique (environ 10 kg). La réaction en chaîne se développe et libère une énergie qui apparaît sous forme de chaleur et, aussi, d'émission de rayonnement gamma.
L'effet de souffle d'une bombe atomique peut raser une surface de 1 km de rayon, et la chaleur dégagée est suffisante pour vitrifier des roches au voisinage de l'explosion ; elle peut également produire des brûlures graves à 10 km de l'explosion.
A cela s'ajoutent les effets radioactifs : rayonnement gamma et effet des retombées des produits de fission.
Une bombe A représente l'équivalent de l'explosion de quelques dizaines de milliers de tonnes de TNT (trinitrotoluène) ♦.

♦ Voir l'article : l'Atome, page 75.

♦ TNT : explosif employé dans les bombes lors de la 2e guerre mondiale. C'est l'explosif classique le plus puissant [$C_6 H_2 (CH_3) (N_2O)_3$]

Bombe thermonucléaire ♦ (bombe H)
Alors que la bombe A utilise l'énergie libérée par la fission d'atomes lourds, la bombe H utilise l'énergie de fusion d'atomes légers. La réaction utilisée est la fusion de l'atome d'hydrogène avec l'atome de tritium pour donner un atome d'hélium :

$$H_1^1 + T_1^3 \longrightarrow He_2^4$$

La masse d'hélium étant de 0,5 % plus faible que la masse des éléments primitifs, c'est l'équivalent de ce défaut de masse ♦ qu'on récupère en énergie.

♦ Pour plus de précisions, lire l'article : la Physique des plasmas, page 476.

♦ Voir l'article : l'Atome, page 52.

La difficulté consiste à vaincre la répulsion électrostatique des noyaux, ce qui n'est possible qu'à une température où l'agitation thermique des noyaux est suffisante, soit quelques millions de degrés. On obtient cette température par une explosion nucléaire qui joue le rôle de détonateur et produit la réaction de fusion au sein d'une masse d'hydrogène et de tritium liquéfiés.
La puissance de la bombe thermonucléaire est de l'ordre de plusieurs millions de tonnes de TNT.

BOSE (sir Jagadish Chunder) pages 508, 509, 515.

Physicien indien, né à Calcutta en 1858, mort au Bengale en 1937.
Après des études dans son pays natal puis en Angleterre, Bose s'installe à Calcutta où il enseigne au collège de la présidence et fonde un Institut de recherches.
Célèbre pour ses travaux sur la physiologie des plantes, Bose invente à ce propos plusieurs instruments d'expérimentation, dont un appareil produisant des radiations électriques très courtes et le « crescographe » qui, amplifiant dix millions de fois un petit mouvement, lui permet de suivre la croissance des plantes. A partir de l'étude de certains phénomènes moléculaires, il met en évidence une propriété générale commune à toutes les formes de la matière, tant inorganiques que vivantes.
Dans le domaine de la physique, il est l'auteur d'une mécanique statistique qui s'applique aux particules de spin entier (bosons). Ces recherches seront ultérieurement reprises et développées par Einstein.

Ouvrages essentiels :
Réactions de la matière vivante et non vivante (Gauthier-Villars, Paris, 1926).
Electrophysiologie comparée (Gauthier-Villars, Paris, 1927).
Le mécanisme nerveux des plantes (Gauthier-Villars, Paris, 1931).

BOSONS ♦ (Bosons) page 508.

♦ Se reporter à l'article : la physique des hautes énergies : les Particules.

Particules obéissant à la statistique de Bose-Einstein, c'est-à-dire pouvant se trouver en nombre quelconque dans un même état quantique par opposition aux particules obéissant à la statistique de Fermi-Dirac, les fermions.
Ce sont des particules dont le spin est entier ou nul. Parmi elles, on trouve les photons, les mésons π et K, etc.

BOYLE (sir Robert) pages 138, 335, 336.

Physicien et chimiste irlandais, né à Lismore Castle (Irlande) en 1627, mort à Londres en 1691.
Élevé dans la stricte foi anglicane, ce mélancolique fils du comte de Cork manifeste très jeune une grande curiosité intellectuelle et s'oriente vers la « Nouvelle philosophie », c'est-à-dire vers les sciences expérimentales alors naissantes. Un séjour à Florence le met en contact avec les disciples de Galilée qui influenceront sa pensée. De retour en Angleterre, il fonde et anime à Londres un groupe de savants qui devient, en 1663, la Royal Society.
Ses nombreux travaux s'étendent à des domaines très divers. Attiré par la théologie, Boyle apprend le latin, le grec et l'hébreu pour pouvoir étayer les arguments polémiques qu'il développe dans plusieurs ouvrages. Pionnier en chimie, son champ d'études préféré, il multiplie les expériences et lance en particulier l'idée que la matière est composée de « corpuscules » se groupant en une substance chimique. Ses principales théories en ce domaine sont exposées dans le célèbre « Chimiste sceptique ».

En physique, Boyle s'adonne particulièrement à l'étude des corps gazeux. Quelque trente ans avant Mariotte (qui ne connaissait d'ailleurs pas les travaux de Boyle), le savant anglais énonce la loi de compressibilité des gaz : la pression d'une masse gazeuse donnée, à température constante, est inversement proportionnelle à son volume. Cette loi porte d'ailleurs le nom de Boyle dans les pays de langue anglaise

et celui de Mariotte en Europe... Les découvertes de Boyle en physique ne s'arrêtent toutefois pas là : il met en évidence le rôle de l'air dans la propagation du son, étudie la force d'expansion de l'eau gelée, détermine le poids spécifique de solides et de liquides, a l'idée d'adopter comme base de température celle de la fusion de la glace, enfin fait de notables apports en optique, en électricité et en hydrostatique.

Ouvrages essentiels :
The Works of the Honorable Robert Boyle (Œuvres complètes) (J. F. Rivington, Londres, 1772) ;
The Sceptical Chemist (Dawsons, Londres, 1965).

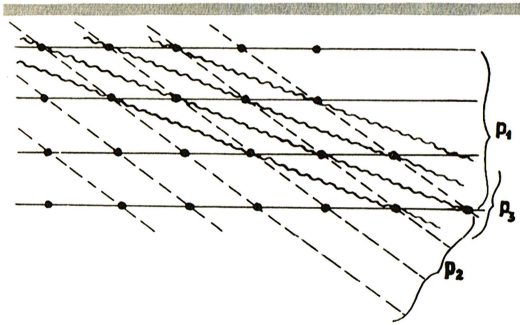
BRAGG (sir William Henry) pages 114, 153.

Physicien anglais, né à Wigton (Cumberland) en 1862, mort à Londres en 1942. Célèbre pour ses travaux sur la diffraction des rayons X par les cristaux, sir William Henry Bragg partage la majeure partie de sa renommée avec son fils, sir William Lawrence. Tous deux reçoivent le prix Nobel de physique en 1915. C'est en Australie, où il est nommé professeur, que sir William Henry entreprend ses premières recherches sur la radioactivité, mais c'est de retour à Londres qu'il connaît la réussite et la célébrité. Avec la collaboration de son fils, il met au point un spectrographe à haute fréquence, fondé sur l'interférence des rayons X. Cet appareil lui permettra par la suite de développer l'étude de la structure de divers atomes et cristaux.

Ouvrages essentiels :
Rayons X et structure cristalline (Gauthier-Villars, Paris, 1921) ;
Studies in Radioactivity (Macmillan, Londres, 1912) ;
Concerning the Nature of Things (New York, 1958).

BRAGG (relation de) (Bragg's law) page 153.

Les cristaux étant constitués de corpuscules (ions, atomes, molécules) régulièrement disposés suivant des plans parallèles et équidistants (P_1, P_2, P_3), on peut définir plusieurs familles de ces plans tels que, d'un plan à l'autre, les constituants du cristal reproduisent le même motif. Ce sont les plans réticulaires.
Chacune de ces familles de plans constitue un réseau de diffraction pour les rayons X.
La relation de Bragg permet de calculer la distance entre deux plans réticulaires successifs d'une même famille. Un faisceau de rayons X tombant sur un cristal



donne naissance à un faisceau réfléchi dont la direction est donnée (par les lois de la réflexion), à partir des plans réticulaires, à condition que la longueur d'onde λ des rayons X et l'angle θ qu'ils font avec le plan réticulaire soient liés par la relation de Bragg :
$2\,d \sin \theta = k\,\lambda$ (k entier).

BROGLIE (Louis de) pages 38, 171, 174, 176, 291, 302, 325, 339, 343, 347, 358, 361, 500.

Louis de Broglie (Viollet).

Physicien français, né à Dieppe en 1892.
D'une illustre famille de maréchaux, d'hommes d'État, d'écrivains et de savants, Louis de Broglie se classe parmi les plus éminents physiciens de ce siècle. Licencié ès lettres, il s'oriente très vite vers une nouvelle voie, la physique, où son frère Maurice excelle déjà. Après la Première Guerre mondiale, durant laquelle il s'occupe de radiotélégraphie, il travaille quelque temps dans le laboratoire des rayons X créé et dirigé par son frère, puis se lance dans la recherche théorique. A la suite d'une remarquable thèse de doctorat, « Recherches sur la théorie des quanta », il obtient le prix Nobel de physique en 1929. Professeur de théories physiques à la Faculté des sciences de Paris, membre puis secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, membre de l'Académie française, Louis de Broglie marque profondément la physique théorique tant par ses divers travaux que par ses nombreux ouvrages.

Ses travaux :
Son nom demeure attaché à trois séries de recherches. La première, exposée dans sa thèse de doctorat, développe l'idée d'une synthèse des ondes et des corpuscules embrassant la physique de la matière et celle de la lumière. Cette hypothèse concilie les deux théories mathématiques, jusque-là apparemment contradictoires, de la lumière. Ce « coup de génie », dira Einstein, pose les bases de la mécanique ondulatoire et se trouve confirmé trois ans plus tard par les expériences de Davisson et Germer aux États-Unis et de G. P. Thomson en Angleterre.

Le second édifice de Louis de Broglie, moins populaire que le premier mais non moins rigoureux et fondamental, est la « théorie du photon ». Cette théorie, qui rend compte de l'ensemble des phénomènes, corpusculaires ou ondulatoires, dus à la lumière, est généralisée par son auteur à toutes les particules à spin.

La troisième grande œuvre, à laquelle le savant français se consacre depuis la Seconde Guerre mondiale, est l'interprétation de la mécanique ondulatoire et le sens à donner au dualisme ondes-corpuscules.
Excellent écrivain, capable d'exprimer sa pensée et ses découvertes en un langage clair et précis, Louis de Broglie a le mérite de renouer la tradition du savant génial doublé d'un homme de lettres éminent.

Ouvrages essentiels :
Introduction à la physique des rayons X et gamma (Gauthier-Villars, Paris, 1928) ;
Introduction à l'étude de la mécanique ondulatoire (Hermann, Paris, 1930) ;
Une nouvelle conception de la lumière (Hermann, Paris, 1934) ;
L'électron magnétique (Hermann, Paris, 1934) ;
Continu et discontinu en physique moderne (Albin Michel, Paris, 1941) ;
De la mécanique ondulatoire à la théorie du noyau (Hermann, Paris, 1943) ;
La théorie des particules de spin 1/2 (Gauthier-Villars, Paris, 1952) ;
La théorie de la mesure en mécanique ondulatoire (Gauthier-Villars, Paris, 1957) ;
Sur les sentiers de la science (Albin Michel, Paris, 1960) ;

La thermodynamique de la particule isolée (Gauthier-Villars, Paris, 1964) ;
Certitudes et incertitudes de la science (Albin Michel, Paris, 1966) ;
Ondes électromagnétiques et photons (Gauthier-Villars, Paris, 1968).

BROGLIE (onde de)

A toute particule en mouvement est associée une onde (onde de Broglie), dont la longueur λ est donnée par la formule : $\lambda = \frac{h}{mv}$, où h = constante de Planck ; m, masse de la particule ; v, vitesse de la particule.
La dualité onde-corpuscule, imaginée par Louis de Broglie, a eu des prolongements très féconds, parmi lesquels la microscopie électronique.

BRÖNSTED (Johannes Nicolaus) pages 23, 81, 125.

Chimiste danois, né à Varde en 1879, mort à Copenhague en 1947.
Des études de chimie à l'université de Copenhague conduisent Brönsted à un poste d'ingénieur chimiste qu'il abandonne bientôt pour se consacrer à l'enseignement et à la recherche en chimie physique. Directeur de l'Institut de physicochimie de Copenhague et membre de la Royal Society, il poursuit une éminente carrière honorifique.
Brönsted est surtout connu pour être, avec T.M. Lowry, l'auteur d'une théorie des solutions qui généralise et complète celle d'Arrhenius et dans laquelle la réaction acide-base se résume à un transfert de protons. On lui doit également des travaux en thermodynamique générale : un nouveau système traitant des rapports chaleur-travail, une théorie sur l'interaction des électrolytes, une séparation d'isotopes et une cynétique des réactions.

Ouvrages essentiels :
Om Relationem mellem Varme og Arbejde (E. Munksgaard, Kobenhaun, 1937) ;
Principer og problemer i energetiken (Bianco Lunos Bogtryk, Kobenhaun, 1946) ;
Der Thermodynamiske hovedsaetningers grundlag og formulerung (E. Munsksgaard, Kobenhaun, 1939).

BROOKHAVEN (U.S.A.)

Laboratoire national de recherches où fonctionnent, entre autres, le premier synchrotron à protons ♦ ayant permis de produire des protons d'énergie comparable à celle des rayons cosmiques (3 GeV) ♦, d'où son nom de « cosmotron », et un synchrotron à protons produisant depuis 1960 des protons de 30 GeV.

♦ Voir Accélérateurs de particules.

♦ 1 GeV = 1 gigaélectron-volt = 1 milliard d'électrons-volts ; c'est l'énergie d'un électron accéléré par une tension de 1 milliard de volts.

BROWN (Robert) page 348.

Botaniste anglais, né à Montrose (Écosse) en 1773, mort à Londres en 1858.
Interrompant des études de médecine, Brown accepte un poste de botaniste dans une expédition chargée de prospecter les côtes australiennes alors pratiquement inconnues. Il en revient riche de près de quatre mille échantillons de plantes. D'abord bibliothécaire à Londres, il se voit ensuite confier la direction du département de botanique lorsque celui-ci est créé au British Museum.
Brown joue un rôle de premier plan dans les premières tentatives d'une classification systématique de la nature et a une influence considérable sur les travaux

de son époque en botanique. La célébrité lui vient toutefois de sa découverte du mouvement désordonné des molécules, qui porte son nom. C'est en étudiant successivement le pollen de plantes vivantes, puis celui de plantes mortes depuis un siècle, et, enfin, des particules inanimées immergées dans l'eau, qu'il met en évidence le mouvement brownien. Ses recherches en ce domaine seront d'ailleurs poursuivies par de nombreux savants et expérimentateurs.

C

CALCUL BINAIRE ♦ (Binary calculation) pages 221 et 222, 224, 225.

♦ Se reporter à l'article : l'Électronique, pages 221 et 222.

Les calculatrices électroniques (ou ordinateurs) utilisent des circuits où l'on n'a que deux possibilités :
— le courant ne passe pas (représenté par 0) ;
— le courant passe (représenté par 1).
Lorsqu'il s'agit de fournir à une machine un nombre représenté par 10 signes, on est amené à fournir à la calculatrice des données sous forme binaire, c'est-à-dire dans un système où l'on écrit les nombres avec les deux signes 0 et 1.
Lorsqu'on utilise le système décimal, on écrit dix, base du système : 10 ; cent : $100 = 10^2$; mille : $1\,000 = 10^3$, etc.
En système binaire, on écrira :

zéro	un	deux	trois	quatre	cinq	six	sept	huit	neuf	dix
0	1	10	11	100	101	110	111	1000	1001	1010

Dans le système de numération binaire ou système de numération à base 2, chaque chiffre représente des unités deux fois plus grandes que le chiffre placé à sa droite. Autrement dit, les unités des différents ordres sont de deux en deux fois plus grandes ou plus petites.
Le système binaire, comme son nom l'indique, n'utilise que deux chiffres, un chiffre significatif, 1, et le 0. Si le système décimal est le plus employé — c'est à l'aide des dix doigts de leurs mains que les hommes ont appris à compter —, le système binaire est, mathématiquement parlant, le plus naturel. Il est en particulier parfaitement adapté aux conditions de fonctionnement des ordinateurs électroniques.
Dans le système binaire 15 s'écrira 1111. Pour l'obtenir, on procède à une suite de divisions par 2, dont on note les restes, 0 ou 1, de droite à gauche, le dernier quotient obtenu représentant les unités du dernier ordre. On adopte de préférence la disposition suivante :

$$\begin{array}{r|l} 15 & 1 \\ 7 & 1 \\ 3 & 1 \\ 1 & 1 \end{array} \quad \text{résultat de} \quad \begin{array}{r|l|l} 15 & 2 & \\ \hline 1 & 7 & 2 \\ \hline & 1 & 3 \quad 2 \\ \hline & & 1 \quad 1 \end{array}$$

Le chiffre 1 de la dernière ligne des quotients est reporté dans la colonne des restes car il fait partie de l'écriture binaire demandée. Le premier reste trouvé correspond au premier ordre, le deuxième au deuxième, etc.
Une fois établie la numération binaire, les opérations arithmétiques se font suivant les règles habituelles, d'autant plus facilement qu'il ne s'agira pour la machine que d'ajouter ou de soustraire 1 ou 0.

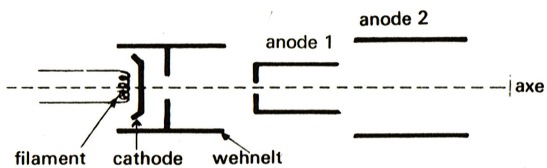
CANON A ÉLECTRONS ♦ (Electron gun) pages 264, 410, 513, 517, 524.

♦ Pour plus de précisions, lire l'article : l'Électronique, pages 228 à 234.

C'est l'élément essentiel du tube cathodique qu'on retrouve dans la télévision, le radar, l'oscilloscope électronique, le microscope électronique, etc.
On y trouve :
— Une cathode émissive, à base d'oxydes de métaux, à faible énergie d'ionisation, chauffée par un filament métallique parcouru par un courant électrique.
— Une électrode appelée wehnelt, portée à un potentiel négatif, qui joue le rôle d'une grille dans une triode ♦ et règle le débit d'électrons.

♦ Voir l'article : l'Électronique, page 232.

— Une série d'électrodes portées à une tension positive, dont le rôle est d'accélérer les électrons et de donner au faisceau d'électrons une forme sensiblement cylindrique.
Le tout est placé dans une enceinte où l'on a fait le vide. Dans ces conditions, les électrons émis par la cathode, chargés négativement, sont plus ou moins repoussés par le wehnelt qui est négatif. Puis ils tombent dans la zone d'attraction des anodes positives, et leur vitesse est de l'ordre de $v = 600\sqrt{U}$, si v est exprimée en km/s et U, tension de l'anode au potentiel le plus élevé, est exprimée en volts : si U = 10 000 volts, par exemple, v = 60 000 km/s.



CAPACITÉ : voir Condensateur et la page 342.

CARBONE (Carbon) pages 47, 108, 110, 116, 127, 129 à 133, 134, 169, 171, 250, 256 273, 306, 337, 410, 502, 503, 504, 529, 531.

Élément n° 6 de la classification périodique. Le carbone se présente comme un mélange de 3 isotopes de masses atomiques 12, 13, 14, dont les abondances ♦ sont :

♦ Abondance : pourcentage de l'isotope dans le mélange naturel.

$^{12}_{6}C$ 98,892
$^{13}_{6}C$ 1,108
$^{14}_{6}C$ ..... traces

Le carbone 14 est légèrement radioactif et son dosage est utilisé pour la datation ♦.

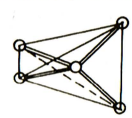
♦ Voir ce mot.

Le carbone pur se présente sous deux variétés ♦ :

♦ Voir l'article : le Cristal, pages 154-155.

— le diamant, très dur, transparent, non conducteur ;
— le graphite, mou, opaque et légèrement conducteur.
Ces propriétés très différentes proviennent d'une différence de structure. En effet, le cristal de diamant se présente comme un assemblage compact et très symétrique d'atomes, chaque atome se trouvant au centre d'un tétraèdre ♦ régulier dont les sommets sont occupés par les atomes voisins. Tous les électrons sont engagés dans des liaisons entre les atomes ; ils ne peuvent donc pas assurer la conduction électrique. Le diamant est un isolant.

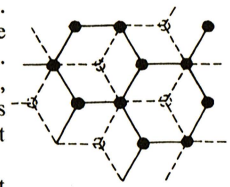
♦ Tétraèdre : volume à 4 faces triangulaires. Tétraèdre régulier : les 4 faces sont des triangles équilatéraux.



Le graphite est très différent : les atomes de carbone sont disposés aux sommets d'hexagones réguliers formant un « pavage » horizontal. Chaque couche est

reliée à la couche supérieure ou inférieure par des forces relativement faibles (forces de Van der Waals) qui ne pourront s'opposer au glissement des feuillets. Cela explique l'utilisation du graphite dans des lubrifiants. Dans ceux-ci, le graphite est en suspension dans une huile minérale et vient s'interposer entre deux surfaces. Lorsqu'on veut mettre en mouvement l'une des surfaces par rapport à l'autre, elle entraîne des particules de graphite, dont les feuillets, glissant facilement les uns sur les autres, diminuent l'effort nécessaire pour produire le mouvement, et réduisent l'usure des surfaces de contact.

graphite



De plus certains électrons sont « délocalisés », c'est-à-dire qu'ils n'appartiennent pas plus à un atome qu'à un autre. Il existe un nuage électronique au-dessus et au-dessous de chaque feuillet et ce nuage assure la conduction dans une direction parallèle au plan du feuillet.

Cette différence de structure est interprétée par l'existence, dans le graphite, de l'hybridation sp^2 des orbitales, responsable de la structure plane, l'atome C du diamant étant dans l'état d'hybridation sp^3, conduisant à la symétrie tétraédrique.

A côté des utilisations classiques du carbone impur (charbons) comme combustible, le graphite est utilisé en technique nucléaire. Il constitue un ralentisseur ♦ de neutrons efficace et on le trouve dans nombre de réacteurs nucléaires.

♦ Voir Réacteurs nucléaires.

Le carbone constitue une grande partie de la matière : les roches calcaires sont constituées de carbonate de calcium. De plus, le carbone est le constituant principal de la matière vivante. Pendant longtemps, on a pu dire que la chimie organique était la chimie du carbone, et cela est encore vrai en grande partie.

CARBURANT (Motor-fuel)

Corps capable de produire, par combustion, une quantité de chaleur qui sera utilisée soit en tant que telle (chauffage, etc.), soit comme source d'énergie dans un moteur thermique (c'est en général dans ce dernier sens que le mot est employé).

Les carburants liquides utilisés dans les moteurs à explosion (essence) sont le plus souvent des carbures d'hydrogène liquides, auxquels on ajoute divers additifs (plomb tétraéthyle, etc.), destinés à éviter l'inflammation prématurée en fin de compression dans le cylindre. Les moteurs à combustion (Diesel) ou à réaction utilisent des produits plus lourds, moins volatils : mazout pour les moteurs Diesel, pétrole lampant ou kérosène pour les réacteurs.

Les carburants gazeux sont généralement des mélanges de méthane et d'éthane (gaz de Lacq comprimé, etc.), ou des gaz provenant de cokeries (mélange de méthane, d'hydrogène, de monoxyde de carbone CO), ou de gazogènes (gaz pauvre : 25 % environ de monoxyde de carbone, le reste étant de l'azote et du dioxyde de carbone CO_2).

CARNOT (Sadi) pages 252, 317, 348.

Physicien français, né à Paris en 1796, mort en 1832.

Fils du « Grand Carnot » qui joua un rôle de premier plan dans la Révolution française, Nicolas-Léonard-Sadi Carnot sort premier de l'École polytechnique pour se lancer dans la carrière militaire. A trente-deux ans, devenu capitaine, il quitte toutefois l'armée, pour se consacrer entierement aux sciences. Emporté par le choléra, il meurt prématurément quatre ans plus tard.

Le nom de Sadi Carnot évoque la découverte du second principe de la thermodynamique : la transformation de chaleur en travail mécanique n'est possible

qu'à partir de deux sources de chaleur à des températures différentes. Ce principe fondamental, sur lequel repose toute la thermodynamique moderne, est exposé dans un ouvrage qui paraît en 1824. Il passe alors totalement inaperçu et ne sera tiré de l'oubli que vingt-cinq ans plus tard par lord Kelvin.
Par ailleurs, des notes publiées un demi-siècle après la mort de Sadi Carnot révèlent qu'on lui doit également la loi d'équivalence entre la chaleur et le travail, ainsi qu'un certain nombre de méthodes modernes permettant de mesurer l'équivalent mécanique de la calorie.

Ouvrage essentiel :
Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance (Blanchard, Paris, 1953).

CARNOT (principe de) (Carnot's principle) pages 98, 496, 515.

Sous sa forme actuelle, ce principe, également appelé second principe de la thermodynamique (bien qu'il soit historiquement le premier...) peut s'énoncer de la manière suivante :
Si une transformation fermée ♦ comportant des échanges de chaleur avec deux sources ♦ produit du travail, le système a reçu de la chaleur de la source chaude et cédé de la chaleur à la source froide.
Ce principe a pour conséquences :
— l'impossibilité de produire du travail, c'est-à-dire de réaliser un moteur à l'aide d'une seule source de chaleur : l'exemple donné par Charles Fabry ♦ était un bateau qui se serait propulsé en empruntant de la chaleur à l'eau de mer et en laissant un sillage de glaçons ;
— la nécessité d'admettre une transformation incomplète de la chaleur en travail, c'est-à-dire un rendement inférieur à l'unité (on doit obligatoirement rendre de la chaleur à la source froide).

♦ Transformation fermée : suite d'opérations ramenant le système à son état initial.

♦ Source de chaleur : thermostat, c'est-à-dire dispositif dont la température est maintenue constante.

♦ Charles Fabry (1867-1945), physicien français, nommé professeur à la Sorbonne et directeur de l'Institut d'optique en 1921. Il est l'auteur de nombreux ouvrages, dont *Physique et astronomie* (1935).

Exemple :
Une locomotive à vapeur emprunte une quantité de chaleur Q_1 à la chaudière (il nous faut donc chauffer cette chaudière). Elle devra restituer à l'atmosphère une quantité de chaleur Q_2, inférieure à Q_1, mais nécessairement différente de zéro. Le travail recueilli est l'équivalent de $Q_1 - Q_2$.
Le rendement est :

$$r = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}, \text{ donc inférieur à } 1.$$

Inversement, on peut imaginer une transformation en sens inverse au cours de laquelle, moyennant la fourniture de travail, on emprunte de la chaleur à la source froide et on en restitue davantage à la source chaude. C'est en effet ce qui est réalisé dans un réfrigérateur. Il existe également des installations de chauffage profitant de la chaleur restituée à la source chaude (thermopompes).

CARNOT (Théorème de) (Carnot's Axiom) page 496.

Il permet de calculer le rendement maximal d'un moteur thermique, rendement très supérieur au rendement réel, car il suppose une transformation infiniment lente, suite d'états d'équilibre, d'un fluide parfait. Les conditions sont très loin d'être réalisées.
Un moteur thermique échangeant nécessairement (principe de Carnot) de la

chaleur avec deux sources, la source chaude à la température t_1°C, ou T_1°K ($T_1 = t_1 + 273°$), la source froide à la température t_2°C ou T_2°K, le rendement maximal r_m est donné par : $r_m = 1 - \frac{T_2}{T_1}$.

Prenons un exemple. La chaudière d'une locomotive est à la température de 200°C, soit 473°K. La source froide est à 100°C ou 373°C (température d'équilibre de la vapeur d'eau à la pression atmosphérique).

Le rendement maximal est : $r_m = 1 - \frac{373}{473} = 0{,}21$.

Pour un moteur Diesel, on peut admettre $t_1 = 1\,500$°C dans le cylindre, $t_2 = 500$°C (gaz d'échappement) :

$$r_m = 1 - \frac{500 + 273}{1\,500 + 273} = \frac{1\,000}{1\,773} = 0{,}57.$$

CATALYSE (Catalysis) pages 120, 134, 321, 454.

Phénomène au cours duquel une réaction chimique se trouve accélérée par la présence de certains corps (catalyseurs) qui ne semblent pas participer à la réaction. Le mot même de catalyse a été imaginé par Berzelius en 1865.

Par exemple, une solution de saccharose (sucre ordinaire) dans l'eau est stable : elle ne subit aucune modification sensible à la température ordinaire. Pourtant, quelques gouttes d'acide chlorhydrique agissant ici comme catalyseur provoquent le passage en glucose et en lévulose.

L'oxygène de l'air, sans action sur les vapeurs d'alcool éthylique, transforme celui-ci en aldéhyde puis en acide acétique au contact d'un fil de platine ou de cuivre porté au rouge.

Limites de la catalyse :

La catalyse ne permet pas d'effectuer des réactions impossibles. Tout au plus, tel catalyseur orientera la réaction vers un des produits possibles (catalyse sélective). La catalyse ne permet pas non plus de reculer les limites d'une réaction, c'est-à-dire d'augmenter la quantité de produit formé.

Un catalyseur n'agit que sur la vitesse d'une réaction et sur celle de la réaction inverse (ce qui explique qu'il ne puisse influer sur le terme de la réaction). Il peut agir alors qu'il est en quantité extrêmement faible par rapport à la masse des corps réagissant, mais, en pratique, on utilise parfois des quantités moins négligeables. Dans les appareils d'oxydation de l'ammoniac, la toile de platine utilisée représente une fortune!

Comment agit un catalyseur ?

Il est difficile de donner une règle générale. Nous distinguerons deux cas.

— *Catalyse homogène :*

Le catalyseur est dans le milieu où s'effectue la réaction. Le mécanisme le plus courant est la formation d'un composé intermédiaire, qui participe à son tour à la réaction donnant le produit final. Un exemple classique est la déshydratation de l'alcool (l'acide sulfurique joue ici le rôle du catalyseur, il se trouve régénéré à la fin de la réaction) :

1er temps :

alcool éthylique + acide sulfurique ⟶ acide monoéthylsulfurique + eau

$$C_2H_5OH + H_2SO_4 \longrightarrow C_2H_5SO_4H + H_2O$$

2e temps :
acide monoéthylsulfurique ⟶ acide sulfurique + éthylène.
$C_2H_5SO_4H \longrightarrow H_2SO_4 + C_2H_4$
Encore faut-il être sûr de l'existence du produit intermédiaire...

— *Catalyse hétérogène* : le catalyseur n'est pas dans le milieu réactionnel (fil de cuivre au contact de vapeurs d'alcool). Dans ce cas, on admet une action de surface : l'un des réactifs est absorbé (c'est-à-dire fixé à la surface) par le catalyseur par un phénomène purement physique (forces de Van der Waals), ou par formation de composés d'addition à la surface du catalyseur (ou chimiosorptions) immobilisant la molécule et facilitant sa mise en contact avec l'autre corps réagissant.

Principaux catalyseurs
Pour des réactions du type hydratation, déshydratation, formation d'alcools, craquage ♦ polymérisation, les catalyseurs sant souvent des oxydes tels que : alumine Al_2O_3, thorine ThO_2, silice SiO_2, seuls ou en mélanges.
Pour les réactions telles que hydrogénation, déshydrogénation, oxydation, les catalyseurs sont en général des métaux du milieu de la classification périodique (métaux dits de transition ou voisins : fer, cobalt, nickel, platine, palladium, cuivre, argent, or, ou des oxydes semi-conducteurs : oxyde de zinc, oxyde de nickel, oxyde de vanadium).

Catalyse biologique et catalyse négative
Il ne faut pas oublier la catalyse biologique, réalisée par les enzymes ♦ ou diastases. Ce sont des corps de masse molaire élevée, contenant souvent un atome métallique qui semble responsable des propriétés catalytiques : ainsi, le fer de la molécule d'hémoglobine ♦. Ces catalyseurs sont spécifiques d'une réaction, et leur nom rappelle celle-ci ; invertases (inversion du sucre en glucose), uréases (hydrolyse de l'urée), etc.

L'inhibition est le phénomène inverse de la catalyse (on dit aussi catalyse négative). La présence d'un inhibiteur retarde une réaction jusqu'à rendre sa vitesse inappréciable. Par exemple, l'eau oxygénée est stabilisée par la présence d'acide.

CATHODE (Cathode) pages 91, 196, 204, 229, 325, 238, 258, 273, 489, 516, 522, 524.

Du grec *kata* = en descendant, et *hodos* = chemin.
La cathode est l'électrode d'un appareil reliée au pôle négatif d'un générateur électrique, donc celle que l'on rencontre en descendant le courant (qui va, conventionnellement, du pôle + au pôle —).
Par extension, on appelle cathode la partie d'un tube électronique chauffé par le filament et qui, de ce fait, émet des électrons.

CATHODIQUE (Cathodic)

Cet adjectif est souvent synonyme d'électronique. On parle ainsi d'émission cathodique pour désigner la production d'électrons par un métal ou un oxyde, par effet thermoélectronique ou photoélectronique.

CATHODIQUES ♦ (RAYONS) (Cathode rays) page 166.

On a longtemps appelé ainsi le faisceau d'électrons émis par effet thermoélec-

♦ Craquage (craking) : fragmentation d'une molécule en plusieurs molécules de masse inférieure. Cette technique permet, par exemple, d'augmenter la quantité d'essence qu'on peut retirer du pétrole brut.

♦ Les enzymes sont des biocatalyseurs, c'est-à-dire des composés chimiques dont la fonction est de « déclencher » et d' « accélérer » les réactions chimiques propres à la matière vivante. Très souvent, les enzymes agissent en transportant des ions ou des électrons d'une molécule à une autre.

♦ Les globules rouges contiennent une charpente protoplasmique incolore appelée stroma et de l'hémoglobine, substance protéinique de couleur rouge foncé imprégnant le stroma. C'est par l'intermédiaire de l'hémoglobine des hématies que l'oxygène est véhiculé dans le sang. En effet, cette substance présente la propriété de se combiner à l'oxygène — lorsque ce dernier est disponible en quantité suffisante — pour donner une substance nouvelle, l'oxyhémoglobine. Ce dernier corps chimique est très instable et, si la quantité d'oxygène ambiant diminue, il se dissocie en oxygène et hémoglobine.

♦ Pour plus de précisions, lire l'article : Électricité et magnétisme, pages 195 et 196.

tronique ou photoélectronique. Il faut noter que le terme rayon est impropre, puisqu'il s'agit d'une émission de corpuscules.

CATHODIQUE ♦ (RÉDUCTION) (Cathodic reaction)

C'est une opération au cours de laquelle on obtient à la cathode d'un électrolyseur un produit moins oxydé, donc réduit par rapport au produit initial ♦. Ainsi, la production électrolytique de l'aluminium est la réduction cathodique de l'alumine.

♦ Pour plus de précisions, lire l'article : la Chimie, page 124, et Oxydation et Réduction.

♦ En chimie, la réduction est le phénomène inverse de l'oxydation.

CATHODIQUE (OSCILLOGRAPHE) (Cathode-ray oscilloscope) : Voir Oscillographe

C.E.A. (Commissariat à l'énergie atomique)

Organisme coordonnant, en France, les questions nucléaires. Dirigé à sa fondation, après la Seconde Guerre mondiale, par Frédéric Joliot-Curie, il l'est maintenant par Francis Perrin. Le C.E.A. administre des établissements de recherches (Saclay, Fontenay-aux-Roses, Grenoble, Cadarache) et des établissements industriels aussi divers que des mines d'uranium, des usines de traitement des minerais et d'enrichissement en produits fissiles, des usines de production d'uranium et de plutonium et des centrales productrices d'énergie électrique.

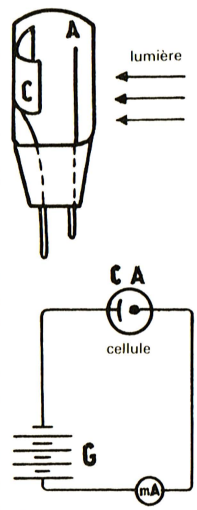
CÉLÉRITÉ (Celerity) pages 35, 102, 183, 265, 305, 330, 505, 532.

Dans le langage courant, synonyme de vitesse. Pour le physicien, la notion de vitesse évoque le transport de matière d'un lieu à un autre. On parlera de vitesse d'un véhicule, d'un projectile, etc.
Au contraire, lorsqu'une vibration se propage, il n'y a aucun transport de matière, mais une propagation d'énergie. C'est dans ce cas qu'on parle de célérité.
On parlera donc de la célérité de la lumière dans le vide : 300 000 km/s, de la célérité du son dans l'air : 300 m/s.

CELLULE PHOTOÉLECTRIQUE (Photoelectric cell) pages 213, 450.

Dispositif permettant d'obtenir, lorsqu'il reçoit de la lumière, un courant électrique proportionnel au flux lumineux incident. Ce phénomène porte le nom d'effet photoélectrique ou effet photoélectronique (appellation plus correcte).
Une cellule photoélectrique comporte : une cathode C, d'un métal tel que le césium, très ionisable, une anode A, face à la cathode. Le tout est placé dans un tube où l'on fait le vide et dont la forme se rapproche de celle d'un tube de radio. La cellule est placée dans un circuit où un générateur G entretient une tension de l'ordre de 100 volts. L'anode A est reliée au pôle plus (+) du générateur. Lorsqu'on éclaire la cathode C, l'appareil de mesure indique le passage d'un courant dans le circuit. Le courant est d'autant plus intense que la lumière reçue par C est intense.
Les photons de lumière incidente, s'ils ont une énergie suffisante, sont capables d'extraire les électrons du métal de la cathode. Ces électrons, chargés négativement, sont attirés par l'anode, positive, et créent un courant électrique dans le circuit. Chaque métal est caractérisé par son énergie d'ionisation. Pour que l'effet photoélectrique se produise, il faut que le photon incident apporte une énergie au

Cellule photoélectrique



G : générateur
mA : appareil de mesure (milliampèremètre)

moins égale à cette énergie d'ionisation ♦ (We). L'énergie d'un photon de fréquence ν étant $h\,\nu$ (h est la constante de Planck), nous aurons la relation : $h\,\nu \geqslant W e$, à la fréquence ν correspond la longueur d'onde $\lambda = \frac{c}{\nu}$ (c = célérité de la lumière). Donc $\frac{h\,c}{\lambda} \geqslant W e$.

On voit que si λ est supérieur à la valeur λ_0, correspondant à l'égalité $\frac{hc}{\lambda_0} = W e$, l'effet ne se produit pas. λ_0, qui caractérise un photon d'énergie juste égale à l'énergie d'ionisation, est appelée longueur d'onde seuil.

♦ Énergie nécessaire pour transformer un atome en ion positif, c'est-à-dire pour extraire un électron de l'atome. Chaque élément est caractérisé par son énergie d'ionisation, qui sera d'autant plus faible que l'élément est facilement ionisable (élément électro-positif). L'énergie d'ionisation est en général de quelques eV (3,9 eV pour le césium, 13,6 eV pour l'hydrogène).

Chaque métal possède sa propre longueur d'onde seuil. Voici quelques exemples :
— pour le zinc, elle est de 0,35 μ ;
— pour le sodium, elle est de 0,50 μ ;
— pour le césium, elle est de 0,66 μ.

La lumière visible comprenant les radiations de longueur d'onde comprise entre 0,4 et 0,8 μ ♦, le choix du césium pour les cellules photoélectriques s'impose.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 14.

Applications

Les cellules photoélectriques sont utilisées dans les lecteurs de bande sonore du cinéma parlant, ainsi que dans divers dispositifs automatiques : ouverture de porte, mise en marche des escaliers roulants, etc.

Il ne faut pas confondre la cellule photoélectrique avec les photopiles utilisées en photographie ou avec les cellules photoconductrices.

L'effet photoélectrique, découvert par Hertz, a été le premier phénomène obligeant à concevoir une énergie lumineuse discontinue. Il est à l'origine de la notion de photon et de quantum d'énergie.

CELSIUS : voir Thermomètre page 517.

CENTRALE (Central) pages 26, 96, 263, 410, 492.

Installation industrielle assurant la production d'énergie électrique par différents procédés.

Dans une centrale hydroélectrique, une chute d'eau entraîne les alternateurs par l'intermédiaire de turbines.

Dans les centrales thermiques, l'énergie est fournie par la combustion de charbon ou de gaz naturel assurant la production de vapeur qui entraîne les turbines couplées aux alternateurs.

Dans une centrale nucléaire, le combustible est un matériau fissile. L'énergie dégagée par la fission dans le réacteur est évacuée sous forme de chaleur et assure la production de vapeur, comme dans une centrale conventionnelle, ou bien l'échauffement d'un fluide décrivant un circuit fermé au cours duquel il actionne les turbines entraînant les alternateurs.

On trouvera donc toujours dans une centrale nucléaire : le réacteur, les échangeurs ♦, les groupes turbo-alternateurs.

♦ Échangeur : dispositif permettant le transfert de la chaleur produite dans le réacteur à l'utilisation. Cet intermédiaire est nécessaire pour éviter la circulation de produits tels que l'eau lourde à l'extérieur du réacteur, avec les risques que cela comporte.

CERENKOV (effet) (Cerenkov effect) pages 139, 441.

Ce phénomène porte le nom du physicien qui l'a découvert ♦.

Une particule peut pénétrer dans un milieu transparent avec une vitesse supérieure

♦ Paul Alexeievitch Cerenkov (né en 1904) a obtenu le prix Nobel de physique en 1958.

à la célérité de la lumière dans ce corps. Il se produit alors une fluorescence, localisée sur un cône dont l'axe est la trajectoire de la particule ; l'angle d'ouverture du cône dépend de l'indice de réfraction et de la vitesse de la particule. Le phénomène est analogue à l'onde de choc se produisant quand un mobile se déplace à une vitesse supérieure à celle du son dans le milieu.
Les compteurs basés sur cet effet permettent donc de mesurer les vitesses des particules ; c'est là leur principal intérêt.

C.E.R.N. (Conseil européen de la recherche nucléaire)

Le C.E.R.N., dont le siège est à Genève, est une organisation groupant les pays de l'Europe occidentale et mettant à la disposition des chercheurs d'importants moyens d'étude des hautes énergies.
Y participent : l'Allemagne fédérale, l'Autriche, la Belgique, le Danemark, l'Espagne, la France, la Grande-Bretagne, la Grèce, l'Italie, la Norvège, les Pays-Bas, la Suède et la Suisse.
Le C.E.R.N. dispose, entre autres, de puissants accélérateurs de particules tel le synchrotron à protons de 28 000 M*e*V ♦ qui est une des plus puissantes machines au monde.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 14.

CHADWICK (sir James) page 351.

Physicien anglais, né à Manchester en 1891.
Ancien élève de Rutherford à Manchester et de Geiger en Allemagne, sir James Chadwick est nommé membre de la Royal Society en 1927. Au cours d'une éminente carrière, il occupe plusieurs postes importants dans la recherche et dans l'enseignement universitaire et, en 1935, reçoit le prix Nobel de physique pour sa découverte du neutron.
Les travaux et découvertes de Chadwick en physique nucléaire le situent dans la grande lignée des Curie et des Joliot-Curie. En dehors de la mise en évidence du neutron, il étudie en particulier la charge des noyaux et la désintégration artificielle des éléments par les particules alpha. Une autre grande découverte est à son actif : celle de l'effet photoélectrique nucléaire, obtenant par les rayons gamma la désintégration du deutérium.

Ouvrage essentiel :
Radiation from radio-active substances (University Press, Cambridge, 1951).

CHALEUR (Heat) pages 79, 84, 88, 92, 93, 118, 123, 134, 136, 141, 157, 191, 197, 230, 252, 253, 254, 256, 263, 264, 265, 266, 269, 308, 313, 315, 316, 340, 355, 419, 454, 478, 492, 498, 509, 514, 515, 516, 517, 525, 532.

C'est une des formes de l'énergie les plus anciennement connues. La chaleur est ce que reçoit un corps dont la température s'élève ou ce que perd un corps dont la température s'abaisse ♦.
La chaleur ou énergie calorifique n'est pas autre chose que l'énergie cinétique des atomes ou molécules constituant les corps matériels.
Cette énergie cinétique est désordonnée, ce qui la distingue de l'énergie mécanique au sens habituel. Le principe de Carnot exprime la difficulté de passer de l'énergie désordonnée (chaleur) à une forme ordonnée (travail).

♦ Dans le langage courant, le mot chaleur s'emploie abusivement pour désigner la température.

Propagation de la chaleur

La nature même de la chaleur fait qu'elle se propage d'un corps chaud à un corps

froid, l'agitation des molécules ou des électrons produisant des chocs sur les molécules ou atomes voisins en augmentant leur énergie cinétique. C'est la propagation par conduction.
La propagation par convection nécessite un support matériel. C'est un phénomène dû, par exemple, aux différences de densité des liquides chauds et froids qui fait circuler ces liquides et transporter ainsi la chaleur (c'est le principe des radiateurs à eau et des installations simples de chauffage central).
La propagation par rayonnement est très différente. Elle s'effectue même dans le vide. En fait, si on considère un radiateur électrique — ou le Soleil —, ces sources n'émettent pas de la chaleur, mais de l'énergie rayonnante, c'est-à-dire des photons dont l'énergie est transformée en chaleur à l'arrivée seulement.

CHAMBRE A BULLES (Bubble chamber) pages 100, 381, 424, 441.

Un liquide entre en ébullition, sous une pression déterminée, à une température fixe qui le caractérise. Des « germes » tels que des particules solides ou des ions doivent servir de point de départ à la formation des bulles gazeuses ♦.
On peut observer des retards à l'ébullition, états instables où l'on trouve du liquide à une pression et à une température correspondant à la vapeur. Il peut arriver, par exemple, que de l'eau très pure se trouve portée à une température supérieure à 100°C, à la pression atmosphérique, sans que l'ébullition se produise. Le phénomène est encore plus net avec du sulfure de carbone, qui peut être porté à plus de 10° au-dessus de sa température d'ébullition sans qu'une bulle apparaisse... L'ébullition se produit lorsqu'on apporte une bulle d'air servant de germe.
Si une particule de haute énergie pénètre dans un tel liquide, elle va provoquer une ionisation sur son trajet. A leur tour, les ions vont servir de germes d'ébullition et provoquer un chapelet de petites bulles matérialisant le trajet de la particule.

♦ Voir Changement d'état.

Tel est le principe d'une chambre à bulles♦, qui comprendra donc :
— une masse de liquide maintenu sous pression ;
— un dispositif (compteur) détectant (à temps) l'arrivée d'une particule et provoquant la dépression dans la chambre, le déclenchement de la photographie, et la recompression, le tout dans un intervalle de temps de l'ordre du centième de seconde.
On utilise les chambres à hydrogène liquide (— 246°C, sous une pression de 6 atmosphères) ou des chambres à liquides lourds (propane, etc.).
Associées à des électro-aimants, les chambres à bulles permettent d'obtenir des renseignements sur la charge, la masse, la vitesse des particules et leur mode de désintégration.

♦ Donald A. Glaser, né à Cleveland en 1926, obtint le prix Nobel en 1960. pour son invention, en 1952, de la chambre à bulles.

CHAMBRE D'IONISATION (Ion chamber)

C'est un dispositif analogue au compteur Geiger ; la chambre d'ionisation comprend une cathode cylindrique, sur l'axe de laquelle est placée une anode filiforme ; le tout est enfermé dans un tube contenant un gaz (azote, brome, hydrogène). Entre anode et cathode est établie une tension de quelques centaines de volts.

Le passage d'une particule dans le dispositif provoque la formation d'un certain nombre d'ions et d'électrons, proportionnel à l'énergie de la particule ♦. Il en résulte un courant entre anode et cathode, également proportionnel à l'énergie

♦ Connaissant l'énergie nécessaire pour produire une paire d'ions dans le gaz remplissant le tube, la mesure de la quantité d'électricité, donc du nombre d'ions produits par la particule incidente, permet de remonter à l'énergie de celle-ci.

de la particule. Une telle chambre peut donc renseigner sur l'énergie moyenne d'un flux de particules, ce que ne peut faire un compteur Geiger.

CHAMBRE DE WILSON ♦ (Wilson cloud chamber)

pages 27, 58, 351, 441, 482, 537.

C'est le « négatif » de la chambre à bulles : au lieu d'utiliser le retard à l'ébullition d'un liquide, on met à profit le retard à la condensation d'une vapeur, en général d'alcool. Là encore, la condensation en gouttelettes se fait autour de « germes ♦ », généralement des ions. Le trajet d'une particule sera matérialisé par la traînée de gouttelettes se formant autour des ions produits par la particule.
La chambre de Wilson, plus longue à réarmer ♦ que la chambre à bulles, est moins utilisée que celle-ci. Elle n'en a pas moins permis, entre autres, la découverte de l'électron positif (positron) et du lepton mu ♦.

♦ (Charles Thomson Rees) Wilson, né en 1869, mort en 1959. Physicien écossais, prix Nobel de physique en 1927 avec Compton, créateur en 1911 de l'appareil qui porte son nom.

♦ Voir Chambre à bulles.

♦ Après le passage d'une particule, il est nécessaire de « réarmer » la chambre, c'est-à-dire de balayer les gouttelettes produites et de se replacer dans les conditions initiales de pression.

CHAMP (Field)

pages 50, 66, 103, 173, 183, 187, 196, 198, 201, 204, 207, 209, 210, 211, 229, 230, 234, 236, 250, 257, 260, 269, 274, 286, 299, 300, 312, 331, 336, 340, 351, 420, 423, 442, 444, 448, 478, 480, 482, 483, 489, 516, 521, 524, 530, 538.

La première définition que l'on peut donner d'un champ est spatiale : un champ est une zone de l'espace ou s'exercent des forces d'une certaine nature.
Ainsi, un corps tombe sur la Terre parce qu'il est soumis à l'attraction terrestre, c'est-à-dire au champ de pesanteur terrestre.
Autres exemples :
— le champ magnétique terrestre, cause de l'orientation d'une aiguille aimantée ;
— les champs magnétiques divers, créés par des aimants ou des courants électriques ;
— les champs électriques causés par la présence de charges électriques.

♦ Voir l'article : la physique des hautes énergies : les Particules, pages 423 et suivantes.

Caractéristiques d'un champ

Il est caractérisé en chaque point par la force qui en résulte sur une particule donnée, placée en ce point. Pour reprendre l'exemple de la pesanteur : une particule de masse m, placée à une distance d du centre de la Terre (de masse M), est soumise à une force d'intensité : $f = \frac{G\,Mm}{d^2}$ dirigée vers le centre de la Terre.

Dans cette formule, G est la constante de gravitation ($G = 6{,}63 \times 10^{-11}$ unité du système international).

La quantité $q = \frac{GM}{d^2}$ caractérise le champ de pesanteur, à la distance d.

Ce n'est rien d'autre que l'accélération de la pesanteur, autrement dit l'intensité du champ de pesanteur.

Les champs électriques ont une expression mathématique analogue.
Comme le champ de pesanteur, ce sont des champs newtoniens : on donne ce nom aux champs créant des forces dont l'intensité varie comme l'inverse du carré de la distance des deux points en interaction ♦.
L'existence du champ ne dépend pas de celle de corps capables de subir son action : le champ de pesanteur lunaire ♦ existait avant qu'un vaisseau spatial y soit soumis.

♦ Voir Champ électromagnétique.

♦ Voir Pesanteur.

Géométrie des champs

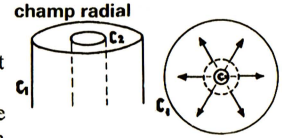
Il est possible de représenter le champ en un point par un vecteur ♦. L'origine de celui-ci sera ce point. Sa direction et son sens seront ceux de la force s'exerçant sur ce point, et sa longueur proportionnelle à l'intensité du champ.

♦ Vecteur : segment de droite orienté. Il représente, en physique, les grandeurs dont il est nécessaire de définir le sens et la direction : poids, force, champ.

Certains cas particuliers sont intéressants : si, dans une zone de l'espace, les vecteurs champ de tout point de cette zone sont équipollents ♦, le champ est uniforme. Si les vecteurs champ sont dirigés suivant les rayons d'un cylindre, le champ est radial.

♦ Vecteurs équipollents : vecteurs parallèles, de même sens et de même intensité.

champ radial

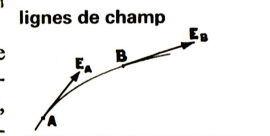


Lignes de champ (ou lignes de force)

Ce sont des lignes telles qu'en chacun de leurs points le vecteur champ en ce point est tangent à la ligne.

L'ensemble des lignes de champ, matérialisées par un moyen approprié, constitue le spectre du champ. On parlera, par exemple, du spectre magnétique d'un aimant ♦.

lignes de champ



♦ On peut l'obtenir, par exemple, en saupoudrant de limaille de fer un carton sous lequel se trouve un aimant. Les grains s'orientent suivant les lignes de champ.

Le champ est, avec la particule, l'un des deux objets fondamentaux de la physique moderne. Le champ assurant l'interaction de deux particules éloignées est caractérisé par l'énergie mise en jeu au cours de cette interaction. Les particules sont, elles, caractérisées par leur masse, c'est-à-dire par une énergie au repos, conformément à la loi d'Einstein. Champ et particule ont donc en commun l'énergie :

— une énergie peut créer un champ de gravitation (en général parfaitement négligeable) ;

— l'énergie propagée par un champ peut être caractérisée par une particule. Le photon est la particule associée au champ électromagnétique ; son analogue pour le champ de gravitation, le graviton, est l'objet de recherches qui n'ont pas encore abouti.

CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE ♦ (Electromagnetic field)

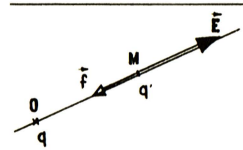
pages 79, 100, 169, 180, 191, 192, 193, 205, 207, 224, 267, 300, 308, 325, 334, 338, 412, 495.

♦ Se reporter à l'article : Électricité et magnétisme.

Champ électrique

Une particule au repos, chargée électriquement, crée autour d'elle des forces qu'on appellera forces électriques ou électrostatiques. Elles sont la conséquence d'un champ, dit champ électrique ou électrostatique, créé par cette particule. L'expression mathématique de ce champ est comparable à celle du champ de pesanteur.

L'intensité E du champ dans le vide est donnée par la formule : $E = \frac{1}{4\pi\,\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}$ où q est la charge de la particule, r la distance de la particule au point M où l'on observe le champ et $\frac{1}{4\,\pi\,\varepsilon_0}$ un coefficient égal à 9.10^9, si q est exprimé en coulombs et r en mètres (le coefficient ε_0 = permittivité du vide).



E : intensité
q : charge de la particule
r : distance de la particule
f : force

Dans ces conditions, une particule de charge q' placée en M subit une force $f = 9.10^9\,\frac{qq'}{r^2}$, l'attirant vers O si q et q' sont de signe contraire, et la repoussant si q et q' sont de même signe.

On peut caractériser le champ électrique en disant que c'est un champ newtonien ♦.

♦ Voir Champ.

Champ magnétique

Lorsqu'un courant circule dans un conducteur, il crée dans son voisinage un champ magnétique, c'est-à-dire qu'il peut faire dévier une aiguille aimantée, tout comme le ferait un aimant (expérience d'Œrsted, 1828). L'un des grands problèmes de la physique, au XIXe siècle, a été le magnétisme, et surtout la relation entre magnétisme et électricité ♦.

♦ Voir l'article : Électricité et magnétisme.

Toute charge électrique en mouvement crée un champ magnétique ou subit des actions magnétiques.

Il en est ainsi, en particulier, dans les aimants, où ces charges ne sont autres que les électrons, dont la répartition permet un effet magnétique global, non nul, contrairement aux autres substances.

Un champ magnétique est caractérisé en chaque point par un vecteur $\vec{B}$, le vecteur induction magnétique. Dans le vide, ce vecteur est égal au produit du vecteur ♦ $\vec{H}$ par la constante μ_0 : $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ (où $\vec{B}$ est l'excitation magnétique et μ_0, la perméabilité magnétique ; dans le système international $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$).

♦ Voir Aperçu mathématique page 17.

Dans une substance matérielle, $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$. ($\mu_r$ est la perméabilité relative du milieu.)

En somme, $\vec{H}$ caractérise l'action du courant ou de l'aimant, et $\vec{B}$ l'effet de cette action.

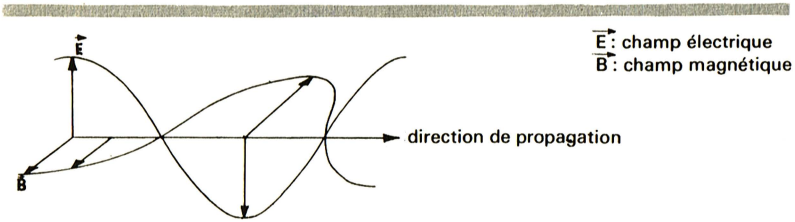
Champ électromagnétique

Cette identité d'origine entre champ électrique et magnétique suggère que ces deux champs ne sont pas indépendants. C'est, en effet, ce que montrent les équations de Maxwell :

$$\left.\begin{array}{l} \text{Équation de Maxwell-Ampère : } \overrightarrow{rot}\,\vec{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \dfrac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \text{Équation de Maxwell-Faraday : } \overrightarrow{rot}\,\vec{E} = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{array}\right\} \text{dans le vide.}$$

Il est donc plus correct de parler d'un champ électromagnétique, l'effet électrique ou l'effet magnétique pouvant apparaître ensemble ou séparément suivant les phénomènes.

La résolution des équations de Maxwell dans un milieu dépourvu de charges (le vide) amène à une solution sinusoïdale, c'est-à-dire à la propagation d'une onde électromagnétique constituée d'un champ électrique $\vec{E}$ et d'un champ magnétique $\vec{B}$, perpendiculaires entre eux et à la direction de la propagation, et en phase.



Elle montre également que la célérité de propagation c est donnée par $\varepsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$. Par ce mécanisme est assurée une propagation de l'énergie par rayonnement, donc la possibilité d'interaction à distance.

La lumière est un cas particulier d'onde électromagnétique et la propagation d'énergie lumineuse se fait de la même façon.

La théorie de Maxwell ne rend pas compte de la quantification de l'énergie ♦. De plus, elle n'est pas relativiste : l'expression du champ magnétique dépend du référentiel dans lequel on l'observe.

♦ Voir Énergie et Photoélectrique (effet).

Actuellement, on admet la dualité onde-corpuscule (L. de Broglie) : un phénomène corpusculaire peut revêtir un aspect ondulatoire, et inversement. Plus généralement, si on attache à tout champ une particule assurant l'interaction, dans le cas particulier de l'interaction électromagnétique, cette particule sera le photon.

D'autre part, l'électromagnétique relativiste ♦ assure une remarquable synthèse avec le « potentiel d'univers ♦ » ; le potentiel électrique et le potentiel vecteur magnétique, dont dérivent respectivement le champ électrique et le champ magnétique, sont les composantes de ce vecteur unique, à considérer dans l'espace temps de Hermann Minkowski ♦, à quatre dimensions.

♦ Voir Relativité.

♦ Potentiel d'univers : le champ électrique $\vec{E}$ dérive d'un potentiel électrostatique V le champ magnétique $\vec{B}$ dérive du potentiel vecteur magnétique $\vec{A}$. Dans l'espace à 4 dimensions, le « potentiel d'univers » est le vecteur dont les 4 composantes sont : les 3 composantes $A_1 = A_X$, $A_2 = A_Y$, $A_3 = A_Z$ du potentiel-vecteur $\vec{A}$ et $A_4 = J\frac{V}{c}$ où J est le symbole $\sqrt{-1}$, c la vitesse de la lumière et V le potentiel électrostatique. (Voir les articles : Évolution des idées en physique, Electricité et magnétisme).

Théorie quantique du champ

La quantification des énergies d'un système de particules liées donne des résultats satisfaisants pour l'étude des rayonnements émis ou absorbés par le système. La quantification du champ électromagnétique (Dirac, Pauli, Heisenberg, Wigner) fait correspondre à un champ de fréquence ν des opérateurs ♦ de destruction ou de production des photons correspondants ; leur existence se trouve justifiée en tant que particules associées au champ électromagnétique, et les échanges d'énergie entre particules se font par l'intermédiaire de ce photon, même si le photon correspondant n'est pas observable (photon virtuel). Cette théorie constitue l'électrodynamique quantique.

Les conséquences de cette théorie sont importantes, car elle rend moins nette la distinction entre les deux éléments fondamentaux de la physique : champ et particule. De plus, l'apparition ou la disparition du photon amène à se demander si d'autres particules peuvent aussi apparaître ou disparaître.

A ce dernier problème, Dirac répond en envisageant la possibilité pour l'électron d'être créé ou détruit, cette destruction correspondant, en fait, à l'émission d'un antiélectron ou positron ; le positron a effectivement été découvert en 1932 par Anderson ♦. La théorie quantique des champs conduit donc à admettre qu'à toute particule correspond une antiparticule (qui peut d'ailleurs lui être identique), et à d'autres conséquences importantes, telles que toutes les lois de la conservation de la charge, de l'énergie, du nombre baryonique, etc.

Une généralisation de la théorie des champs aux forces intranucléaires a amené Yukawa a émettre l'hypothèse d'une particule responsable du champ nucléaire, le méson ♦.

♦ Mathématicien lituanien (1864-1909), un des précurseurs de la relativité restreinte.

♦ Opérateurs : êtres mathématiques réalisant sur une fonction une certaine « opération ».

♦ Voir l'article : la physique des hautes énergies : les Particules, page 429.

CHARGE (Charge) pages 29, 34, 99, 100, 139, 142, 145, 177, 185 à 191, 194, 196, 197, 202, 205, 206, 250, 275, 309, 334, 340, 346, 351, 356, 413, 414, 415, 417, 420, 426, 429, 436, 439, 447, 452, 480, 482, 484, 489, 499, 518, 530.

♦ Voir page 422.

La force électrostatique s'exerçant entre deux corps, à distance maintenue constante, dépend d'une propriété de ces corps : leur charge électrique.

Si un corpuscule électrisé attire de la même façon deux corpuscules dans les mêmes conditions, leurs charges sont égales. Plus généralement, si des corpuscules, placés successivement au même point d'un champ électrique, subissent des forces trois fois plus grandes que celles que subit un corpuscule pris comme base de comparaison, leur charge est trois fois plus grande que celle de ce corpuscule de référence.

L'unité de charge est le coulomb : deux charges de 1 coulomb à 1 m l'une de l'autre s'attirent (ou se repoussent) avec une force de 9.10^9 newtons (environ 900 000 000 kg).

La charge électrique peut être positive ou négative (on pense plutôt que la charge positive est une absence de charge négative). Elle est quantifiée : la charge est un multiple positif ou négatif de la charge de l'électron (ou charge élémentaire) qui vaut $1{,}6.10^{-19}$ coulomb.

CHIMIE (Chemistry) voir l'article pages suivantes et les pages 26, 27, 85, 88, 94, 134, 196, 197, 205, 250, 254, 257, 258, 271, 275, 316, 320, 323, 326, 333, 339, 340, 356, 449, 478, 492, 496, 501, 509, 511, 515.

La chimie

par Jacques Burko

L'image classique de la chimie est celle d'une science expérimentale, essentiellement descriptive. Les vieux traités ne font que cataloguer les propriétés de divers corps. Les grands classements, les propriétés communes à une famille de composés ou d'éléments analogues ont été constatés plutôt que prédits ; les hypothèses de Mendéléïev sur le comportement des « eka-éléments ♦ », inconnus au moment où celui-ci dressait son tableau périodique des éléments ♦, sont une des premières manifestations de l'esprit déductif dans la chimie, alors essentiellement expérimentale.

Jacques Burko
né en 1933, ingénieur chimiste. Il est actuellement journaliste scientifique et chef de département dans une grande société industrielle.

Cette image ne correspond plus à la réalité. De plus en plus, la prévision remplace la vision et il devient possible de simuler les réactions chimiques et le comportement des corps à l'aide d'ordinateurs. En effet, parallèlement à l'approfondissement de nos connaissances sur la matière, notre connaissance des phénomènes chimiques va en s'améliorant.

A un certain moment, la physique et la chimie se rejoignent étroitement : au niveau des structures atomiques, c'est plutôt la direction des préoccupations que leur nature qui distinguent le savant physicien de son collègue chimiste.

Cette unité fondamentale, due au fait que les deux travaillent sur la matière — sur la même matière —, tentant d'en circonscrire les différents aspects, explique et justifie une étude sur la chimie au sein d'un ouvrage consacré à la physique. Partis d'horizons différents, le chimiste et le physicien se retrouvent autour de la même table, joignant leurs efforts pour une meilleure connaissance du monde matériel qui nous entoure. De plus en plus, le chimiste fait appel à des outils physiques pour faire avancer son propre domaine.

Aussi, parmi les grands chapitres traditionnels de la chimie, la chimie physique occupe une place importante ; cette science est à cheval sur les deux spécialités et efface en fait la frontière tracée jadis artificiellement entre elles. C'est même peut-être la partie la plus « noble »

♦ Eka-éléments : éléments alors hypothétiques devant, selon Mendéléïev, occuper les cases qu'il avait laissées vides dans sa classification.

♦ Voir pages 42 et 43.

de la chimie, si un tel qualificatif peut être appliqué aux sciences, dans la mesure où la chimie physique s'efforce d'aller au-delà du fait chimique et expérimental pour tenter d'en rationaliser l'interprétation en appliquant les outils physiques et mathématiques. Ce sont ses méthodes qui ont permis, par une investigation fine au niveau submicroscopique, de comprendre et d'interpréter la plupart des phénomènes chimiques.

OBJET DE LA CHIMIE

L'objet premier de la chimie est de connaître, décrire, prévoir et appliquer les transformations que subissent les différents corps au contact les uns des autres ou encore sous l'influence de modifications des conditions physiques. Au sens plus large, c'est la science des transformations de la matière (du moins, tant qu'il n'y a pas transmutation ou conversion de matière en énergie et réciproquement). Au niveau submicroscopique, cela se traduit par l'étude des phénomènes qui intéressent les couches électroniques externes des atomes, puisque les phénomènes chimiques, en général, se fondent sur les interactions superficielles des atomes entre eux. Dès que l'on perce cette première enveloppe de l'atome, et plus encore lorsqu'on s'attaque au noyau lui-même, l'on entre dans le monde de la physique nucléaire. Là encore, les distinctions sont parfois peu nettes et les deux sciences s'interpénètrent et convergent dans un même souci de mieux comprendre la nature des choses.

Les transformations chimiques n'intéressent que les électrons externes d'un atome

Le monde de la chimie est ainsi celui des électrons les plus externes de chaque atome ; ce sont ces électrons qui interagissent lors des réactions chimiques, et leur réarrangement commun crée les liens qui lient les atomes au sein des molécules ♦. Pour cette raison, les véritables mécanismes des réactions chimiques n'ont pu être élucidés que lorsque notre connaissance de la structure atomique et moléculaire a fait des progrès suffisants. En passant de l'échelle microscopique au submicroscopique, les savants ont pu comprendre un certain « comment » des réactions chimiques et les raisons profondes de comportement des corps. Il a fallu connaître la particule première de la chimie, l'atome, la façon dont les atomes se lient en molécules et, enfin, les interactions des molécules voisines entre elles, pour parvenir à ce résultat. De là vient le développement remarquable des méthodes physiques d'investigation en chimie : les spectres Raman ♦, la résonance magnétique, toute la gamme d'outils de même type, qui ont pour objet de « voir » ce qui se passe à l'intérieur même d'une molécule. Grâce à ces méthodes, nous savons aujourd'hui comment sont disposés les divers atomes à l'intérieur d'un édifice moléculaire, comment ils s'enveloppent d'un nuage électronique

♦ Les atomes isolés sont rares dans la nature ; généralement, ils s'associent pour former des édifices dont les plus petits n'en comprennent que deux, tandis que les plus grands peuvent en compter des milliers.

♦ Voir page 115.

commun et comment cette structure intime se répercute sur les propriétés du corps à notre échelle. Toutes les grandes lois expérimentales dues au génie des chimistes du siècle dernier ont pu trouver une interprétation plus fine qui en démonte les mécanismes.

Atomes et édifices atomiques

Toute l'infinie variété de corps qui nous entourent est due à la combinaison d'un nombre relativement restreint d'éléments, donc de corps simples ♦ : il n'y a dans la nature qu'une centaine de types différents d'atomes. L'oxygène, le fer, le soufre en sont des exemples courants. D'autres sont fort rares. De plus, depuis que nous savons manier et modifier les noyaux atomiques, l'homme n'a cessé d'ajouter à cette liste d'éléments naturels d'autres éléments, qui n'ont jamais existé sur la Terre ou bien qui en ont disparu parce qu'ils n'étaient pas stables et ont fini par se transmuter en d'autres éléments. Du neptunium et du plutonium, les plus connus, on est progressivement passé à l'élément portant le numéro 104 ♦ et la liste n'est pas close (en général, plus le nouvel élément est lourd, plus il est instable et son existence éphémère ; mais, pour des raisons complexes de stabilité de noyaux atomiques, cette loi n'est pas absolue et il est théoriquement possible de prévoir que certains des éléments encore à découvrir auront une période plus longue que les derniers-nés de l'alchimie moderne ♦).

♦ Un corps simple est un corps formé d'atomes identiques. L'oxygène O_2 est un corps simple. L'élément est la partie commune à un corps simple et à tous les composés qu'on peut former avec lui. On parlera ainsi de l'élément oxygène, commun au gaz oxygène et aux oxydes (voir aussi Élément).

♦ Le kourtchatovium, appelé ainsi par les Soviétiques.

♦ Voir Nombres magiques.

Un élément est caractérisé par des atomes de cortège électronique identique

Tous les atomes qui caractérisent un élément chimique ont la même structure quant aux électrons qui tournent autour du noyau ; ainsi, tous les atomes de carbone ou de fer ont le même nombre d'électrons, ordonnés de la même façon. Le noyau lui-même peut présenter de légères variations de masse : certains atomes d'un élément peuvent être plus massifs que leurs voisins ; on dit que cet élément possède plusieurs isotopes. Mais, du fait que le cortège des électrons est le même pour toutes ces variétés d'un même élément et que les propriétés chimiques ne dépendent que du comportement de ces électrons, tous les atomes d'un élément se comportent de façon identique pour le chimiste.

Allotropie

Parfois, un corps simple peut présenter des variétés, des formes différentes qui se comportent de manière très diverse et qui n'ont pas le même aspect. C'est le cas pour le graphite et pour le diamant ♦, pour l'oxygène ordinaire et pour l'ozone, pour le phosphore rouge et blanc. Mais ces différences-là ne sont pas dues à des différences de constitution des atomes ; ceux-ci sont simplement liés en des édifices

♦ Voir l'article : le Cristal, pages 154 et 155.

qui diffèrent par leur structure et par l'arrangement des électrons. Comme, de façon générale (à l'exception des gaz rares), les atomes d'un élément se regroupent dans les conditions habituelles en molécules ou en cristaux, lorsque l'on met cet élément en présence d'un autre corps et qu'ils réagissent ensemble, ce sont des édifices complexes, molécules ou cristaux, que l'on confronte et non des atomes isolés. Ce qui se passe alors dépend donc des caractéristiques de ces édifices et, si les mêmes atomes d'un même élément peuvent former des structures de formes différentes, entourées de nuages électroniques de configurations différentes, il est prévisible que, selon la variété de structures que l'on aura choisie, le phénomène observé sera différent. Ces diverses formes d'un même corps s'appellent formes allotropiques.

Corps purs

Lorsque l'on fait réagir deux éléments entre eux, les molécules de l'un se transforment au contact des molécules de l'autre ; les atomes se réarrangent différemment et, après réaction, il se forme de nouvelles molécules qui contiennent des atomes des deux constituants. Le carbone, brûlant dans l'oxygène, livre du gaz carbonique : chacune des molécules de ce nouveau venu contient un atome de carbone et deux d'oxygène.

Dans un corps pur composé, les molécules sont identiques et les atomes différents

Si les quantités des deux éléments ont été choisies pour qu'il n'y ait aucun excès de l'un d'eux par rapport à l'autre ♦ et si la réaction est totale, toutes les molécules qui résultent de l'expérience sont identiques (encore que, dans certains cas et notamment pour des macromolécules organiques, la taille de ces macromolécules peut être variable, mais alors le motif élémentaire, qui se répète un grand nombre de fois dans la molécule, reste le même). On obtient alors un corps pur. Mais, si toutes les molécules d'un corps pur sont identiques entre elles, à la différence d'un élément, elles comprennent des atomes de plusieurs espèces. Dans un cas simple, comme celui de la combustion de carbone dans l'oxygène, il n'y a que deux espèces d'atomes dans la molécule résultante : ce corps pur est formé par la combinaison de deux éléments. Il peut y avoir un grand nombre d'atomes de nature différente dans la molécule d'un corps pur ; par exemple, le phosphate acide de sodium, corps de structure relativement simple, contient dans chacune de ses molécules des atomes de phosphore, d'oxygène, d'hydrogène et de sodium.

♦ On dit que les deux éléments ont été confrontés dans une proportion stoechiométrique.

Le mélange : une juxtaposition de corps purs

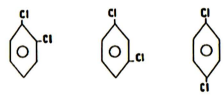
Si, dans notre expérience de combustion de carbone dans l'oxygène, nous avions laissé un excès d'oxygène, il serait resté en fin de réaction des molécules d'oxygène intactes, faute d'atomes-partenaires de carbone. Il en résulterait un mélange de molécules de gaz carbonique

et d'oxygène : ce ne serait plus un corps pur, mais un mélange. L'écrasante majorité des objets qui nous entourent sont des mélanges : le bois, l'acier, la terre, l'eau ordinaire (et, donc, impure), l'air sont des mélanges. On peut séparer chaque mélange en ses éléments constitutifs qui seront des corps purs : il s'agit, en définitive, de trier les molécules. Cela est toujours possible avec plus ou moins de facilité, car les différentes molécules ont des comportements différents dans certains processus physiques. Le tri peut se faire par criblage, évaporation, distillation fractionnée, chromatographie, dissolution sélective, etc.

Bien entendu, les différents corps purs peuvent, à leur tour, réagir entre eux ou avec des corps simples, échangeant certains atomes et formant de nouvelles molécules : l'acide sulfurique réagit avec la soude pour former du sulfate de sodium et de l'eau ; l'acide chlorhydrique attaque le fer ; l'hémoglobine réagit avec l'oxygène de l'air. Les édifices moléculaires peuvent devenir très complexes et contenir plusieurs milliers d'atomes.

Outre les corps purs, dans lesquels les proportions des divers éléments qui les composent sont fixes, et les mélanges, où ces proportions sont quelconques, on distingue des composés non stoechiométriques, de composition variable. Généralement, il s'agit là de corps cristallisés, dans lesquels les atomes d'un corps étranger viennent se substituer à ceux qui forment le réseau de base. Cette substitution, qui ne peut se faire qu'à condition que les « intrus » soient d'une taille et d'une configuration compatibles avec le cristal où ils s'insèrent, peut être plus ou moins poussée, ce qui explique la composition globale variable de tels composés. Les exemples sont nombreux parmi les alliages (par exemple, les alliages or-cuivre, titane-zirconium, etc.) ; on en trouve également parmi les macromolécules organiques.

◆ Lorsque l'on attache deux atomes de carbone à un noyau benzénique, la molécule qui en résulte peut avoir trois configurations différentes. De droite vers la gauche, nous avons schématisé les molécules des divers dichlorobenzènes : orthodichlorobenzène, métadichlorobenzène et paradichlorobenzène.



◆ Aliphatique : voir note page 116.

◆ C'est le cas du butane qui existe sous deux formes :

$CH_3—CH_2—CH_2—CH_3$

ou

$$CH_3—\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}—CH_3$$

L'isomérie

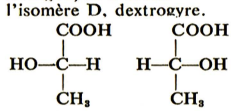
Comme pour les éléments, l'arrangement des atomes dans une molécule d'un corps pur peut varier, conférant au corps des propriétés physiques et chimiques différentes. Les atomes sont liés à l'intérieur de l'édifice moléculaire en une structure définie, sinon invariable ; leur position dans l'espace est importante et peut modifier le comportement du corps. On connaît bien les différences dans les propriétés des dichlorobenzènes selon que les deux atomes de chlore sont attachés au noyau benzénique en position ortho-, méta- ou para- ◆. Les propriétés physiques de certains carbures aliphatiques ◆ varient selon que les atomes de carbone qui en forment le squelette sont placés à la queue leu leu en une seule chaîne ou bien quand celle-ci comporte des ramifications latérales ◆. L'indice d'octane ◆ d'une essence dépend directement de cette circonstance (on sait à présent

◆ Les propriétés antidétonantes d'une essence varient selon la proportion de carbures ramifiés qu'elle comporte. Pour apprécier cette qualité, on compare le comportement de l'essence étudiée à celui d'un mélange étalon dans lequel on fait varier de 0 % à 100 % la proportion d'un certain iso-octane ramifié. On obtient ainsi l'« indice d'octane » de l'essence. Depuis que cette échelle a été introduite, on a mis au point des essences qui détonnent moins que l'iso-octane pur : l'indice d'octane d'une essence peut ainsi être supérieur à 100.

séparer de tels mélanges, même à l'échelle industrielle, en utilisant des « tamis moléculaires », corps présentant des porosités suffisamment fines pour que seules les molécules non ramifiées puissent se glisser à travers les pores). De tels corps, dont les molécules sont formées d'atomes identiques mais arrangés en des structures spatiales différentes, s'appellent des isomères.

Un cas particulier est celui des molécules dont la structure spatiale peut présenter deux formes symétriques l'une de l'autre par rapport à un plan ♦. Cette faible différence confère aux deux variétés des propriétés macroscopiques distinctes, en particulier sur le plan cristallographique et optique. Les cristaux (si le corps cristallise) sont formés entièrement soit de molécules « droites », soit de molécules « gauches » et la forme du cristal comme ses propriétés optiques témoignent de cette différence intime. Lors des synthèses chimiques, on obtient généralement un mélange des deux variantes moléculaires en quantités égales, ce qui donne un corps apparemment inactif optiquement (mélange racémique). Mais, dans les êtres vivants, souvent une seule des deux formes existe.

♦ L'acide lactique CH_3—CHOH—COOH peut présenter deux formes symétriques par rapport à un plan. On dit que l'atome central de carbone de cet édifice est asymétrique : les quatres groupes CH_3, H, OH et COOH qui lui sont attachés peuvent être disposés dans l'espace de deux manières non superposables. Nous avons représenté à gauche l'isomère L, lévogyre, et à droite l'isomère D, dextrogyre.



La tautomérie : déplacement des atomes à l'intérieur d'une molécule

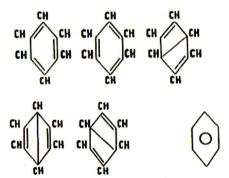
Enfin, souvent des isomères d'un même corps peuvent, selon les circonstances où l'on place ce composé (et, en particulier, selon la nature des réactifs chimiques auxquels on le confronte), se transformer, conférant à la molécule des propriétés différentes. Dans un tel cas, un atome ou un groupe d'atomes (radical) change de position à l'intérieur de la molécule. On dit alors que cette dernière présente un cas de tautomérie ♦.

♦ Exemple classique de la tautomérie en chimie minérale : l'acide cyanhydrique. Selon les circonstances, sa molécule prend l'une ou l'autre des configurations représentées ci-dessous : H—C ≡ N ou H—N ≡ C.

La mésomérie : les molécules oscillent entre différentes formes

Souvent, les molécules peuvent prendre des formes spatiales différentes et oscillent effectivement sans cesse entre ces différentes structures. La molécule présente alors à l'extérieur des propriétés intermédiaires entre celles qui caractérisent chacun de ces états définis. On dit que la molécule possède plusieurs états mésomères ♦.

♦ La molécule cyclique du benzène renferme six carbones et trois doubles liaisons. Ces dernières peuvent théoriquement occuper les 5 différentes positions indiquées sur la figure. On a longtemps discuté pour savoir quelle était leur répartition réelle. En fait, la molécule oscille sans répit entre les différentes formes possibles, ce que l'on a fini par schématiser par le symbole représenté à l'extrême droite de la figure.



Structure de l'atome - Atome de Bohr

Ce qui distingue un élément d'un autre, c'est le nombre d'électrons qui gravitent autour du noyau central et, comme un atome est électriquement neutre, le nombre de protons qui entrent dans la composition de ce noyau. Le plus simple des atomes a un seul proton au noyau et un seul électron périphérique : c'est l'hydrogène. L'élément suivant a deux électrons et deux protons nucléaires : c'est l'hélium, dont les propriétés sont tout à fait différentes. Progressivement, l'atome grossit quand on passe aux éléments de structure plus complexe et le nombre d'électrons tournant autour du noyau augmente. Ce nombre d'électrons et de protons qui caractérise un élément constitue le numéro atomique de l'atome. Très grossièrement,

la structure d'un atome moyen ressemble à celle d'un oignon : autour d'un noyau central, des couches d'électrons se superposent. Cette superposition est régie par des lois très strictes d'encombrement, traduites par les valeurs du nombre quantique principal n (la situation des électrons dans un atome est décrite par quatre nombre quantiques ♦ qui en définissent les aspects caractéristiques) : n est égal à 1 pour la première couche (appelée couche K) ; $n = 2$ pour la seconde couche, dite couche L, etc. La première couche, la plus proche du noyau, ne peut recevoir que deux électrons au maximum. Dès qu'un atome a plus de deux électrons, les suivants se rangent dans la deuxième couche, qui se sature à son tour à huit électrons répartis en quatre doublets ; la troisième (couche M) peut recevoir 18 électrons, la quatrième 32, etc. Les atomes les plus lourds ont jusqu'à sept couches électroniques, chacune d'elles se subdivisant à son tour en sous-couches, caractérisées par le nombre quantique secondaire de ses électrons. Ce modèle atomique a été appelé atome de Bohr.

♦ Voir l'article : l'Atome, pages 38 à 41.

Seul le calcul de la probabilité de présence d'un électron est possible

Depuis le principe d'incertitude d'Heisenberg, on sait qu'il est impossible de connaître à la fois la position et la quantité de mouvement d'une particule. Ce qu'il est possible d'atteindre, c'est la probabilité de présence d'un électron au voisinage d'un point de coordonnées x, y, z, traduite par la fonction d'onde ψ de l'électron considéré : $\psi^2(x, y, z)\, dx\, dy\, dz$.

Pour atteindre cette fonction d'onde, il faut résoudre l'équation aux dérivées partielles de Schrödinger, dans laquelle interviennent l'énergie totale de l'électron et son énergie potentielle. Cette solution n'est pas possible systématiquement ; on n'a pu trouver de résolution analytique que pour le cas le plus simple : celui de l'hydrogène. Mais les résultats peuvent servir au moins de modèle approché pour les autres atomes. ψ est une fonction purement mathématique : son carré, ψ^2, a toutefois une réalité physique : c'est la probabilité de trouver au point considéré un électron ayant le système donné de nombres quantiques. Dès lors, on trace des orbitales, qui sont des représentations géométriques de ψ^2 tracées pour des valeurs constantes de ψ choisies pour que, dans le volume englobé par l'orbitale, la probabilité de présence de l'électron soit supérieure à 95 %. Cette digression illustre le fait qu'à l'échelle subatomique il n'est de raisonnements que statistiques.

Masse atomique

Les atomes étant très petits, leurs masses respectives, exprimées avec nos unités habituelles, sont extrêmement faibles (un atome d'hydrogène pèse $1{,}67 \times 10^{-24}$ gramme). Pour les comparer entre eux, on a pris successivement pour étalon l'atome d'hydrogène normal (H = 1), puis l'atome d'oxygène (O = 16), enfin, depuis 1961, l'atome de carbone le plus courant (C = 12). Bien entendu, une fois ce système établi et la masse d'un atome de carbone fixée à douze unités de masse atomique, tous les autres atomes peuvent

être « pesés » et comparés à l'aide de cet étalon. Par ailleurs, on peut trouver un nombre précis d'atomes de carbone tel que la masse de cet ensemble d'atomes soit égale à 12 grammes. Comme un atome est très petit, ce nombre (appelé « nombre d'Avogadro ») est très grand. Il est égal environ à $6{,}023 \times 10^{23}$ ♦. Pour le chimiste, qui opère sur des quantités pondérables de composés, la masse d'un atome isolé n'est pas d'un grand intérêt. On opère donc en chimie sur des quantités macroscopiques. On a appelé atome-gramme la masse d'un échantillon d'un élément égal à $6{,}023 \times 10^{23}$ atomes de cet élément (soit la masse d'un atome multipliée par le nombre d'Avogadro). Un atome-gramme de carbone est ainsi voisin de 12 grammes ; un atome-gramme d'hydrogène représente environ 1 gramme de cet élément ; un atome-gramme d'uranium contient 238 grammes de métal. On symbolise l'atome-gramme par le symbole de l'élément. Il y a là une certaine ambiguïté, mais le fait est que le symbole O représente à la fois un atome d'oxygène et 16 grammes (un atome-gramme) de cet élément.

♦ 602 300 milliards de milliards.

Masse moléculaire (ou molaire)

La molécule est formée par l'union des atomes qui la constituent et dont les masses, additionnées, constituent la masse moléculaire du corps considéré. Ainsi, la molécule de chlore contient deux atomes de cet élément : la masse moléculaire de chlore est le double de sa masse atomique. Dans un composé, comme l'eau, la masse moléculaire est la somme des masses des différents atomes constitutifs. Bien entendu, seuls les corps purs, éléments ou composés définis, ont une masse moléculaire. Les chimistes, qui raisonnent sur un grand nombre de molécules à la fois, opèrent à l'aide de molécules-grammes, dites encore moles. Une molécule-gramme d'un composé est la somme des atomes-grammes des éléments qui le constituent. Elle se déduit de la masse réelle d'une molécule isolée en multipliant cette masse par le nombre d'Avogadro. Ainsi, pour l'alcool éthylique, de formule brute C_2H_6O, la masse moléculaire exprimée en molécules-grammes est égale à $(2 \times 12) + (6 \times 1) + 16 = 46$ (en chiffres approchés).

Volume moléculaire (ou molaire)

Dans le cas particulier des corps gazeux, il se trouve que, dans les mêmes conditions de température et de pression, quand on prend un même nombre de molécules d'un corps, cette quantité de ce corps occupe toujours le même volume, indépendant de la nature de ce gaz. On a appelé volume moléculaire le volume occupé par une molécule-gramme de gaz. Ce volume est égal à 22,4 litres pour tous les gaz ♦.

♦ A 0°C et sous la pression atmosphérique normale, soit 76 cm de mercure.

La liaison chimique,
conséquence de la structure électronique de l'atome

Le comportement chimique d'un élément est régi, nous l'avons dit, par les électrons externes de ses atomes. Si la couche externe est saturée, sa stabilité est très grande et l'atome n'aura pas tendance à réagir sur d'autres atomes. C'est ce qui se produit avec les gaz rares ou inertes, appelés ainsi en raison de leur apathie. Dans tous les autres cas, l'atome tendra vers cette structure privilégiée. Quand la couche externe ne comporte qu'un seul électron, l'atome aura tendance à s'en défaire en le cédant à des atomes voisins si ceux-ci peuvent l'accueillir. C'est le cas des métaux alcalins ♦ qui, abandonnant leur seul électron périphérique, rompent la neutralité électrique de leur atome et deviennent des ions positifs. Si la couche externe est, au contraire, presque complète et ne comporte qu'une place vide, l'atome aura tendance à combler cette lacune, à capter un électron étranger afin d'acquérir la structure apparente d'un gaz rare. Ces atomes, de ce fait, porteront une charge négative, provenant de cet électron surnuméraire, et deviendront des ions négatifs (anions). C'est le cas des halogènes : fluor, chlore, brome, etc. On comprend dès lors le mécanisme des réactions comme celle du chlore sur le sodium : chaque atome de chlore capte un électron que l'atome de sodium abandonne facilement : $Cl_2 + 2Na \longrightarrow 2Cl^- + 2Na^+$. Les atomes polarisés, ionisés, s'attirent alors et forment des édifices ioniques où chaque ion est maintenu en place par des forces électrostatiques. On nomme ces liaisons hétéropolaires.

♦ Lithium, sodium, potassium, etc. (première colonne du tableau périodique) : voir page 42.

Les atomes qui ont deux électrons sur leur couche externe auront également tendance à les céder, formant des cations porteurs d'une double charge positive, tandis que les atomes auxquels il manque deux électrons chercheront, pour compléter la leur, à les capter, formant des anions également bivalents. C'est ainsi qu'un atome de calcium se combine avec deux atomes de chlore ou qu'un atome d'oxygène se combine à deux atomes de sodium.

L'électrovalence : transfert des électrons d'un atome à l'autre

Ce mécanisme de réaction par cession d'un ou de plusieurs électrons s'appelle électrovalence. Souvent, ce n'est pas un atome isolé qui cède un ou plusieurs électrons à un partenaire : l'électrovalence affecte aussi des ions complexes. Les corps formés avec mise en jeu d'électrovalence s'appellent des électrolytes ; lorsqu'on les dissout dans l'eau, ils se dissocient en libérant leurs ions constitutifs. Cette hydrolyse peut être plus ou moins complète ; on parle, dans le premier cas, d'électrolytes forts et, dans le second, d'électrolytes faibles.

La covalence : mise en commun d'électrons périphériques

Souvent, dans leur tendance à acquérir la structure d'un gaz rare, deux atomes voisins mettent en commun un ou plusieurs couples d'électrons. C'est, par exemple, le cas de deux atomes d'oxygène

formant une molécule de ce gaz. Une telle liaison ne polarise pas les deux atomes, ne les transforme pas en ions. La molécule est homopolaire. On appelle cette forme de liaison covalence. Dans la réalité, il existe tous les cas intermédiaires entre les électrovalences et les covalences, et les électrons de liaison peuvent alors se trouver de plus en plus loin de la position médiane entre les deux atomes pour appartenir à un seul d'entre eux de façon plus ou moins marquée ♦. Il existe d'autres formes de liaisons chimiques : la coordinence, qui lie entre eux les atomes à l'intérieur des ions complexes, les forces de Van der Waals, la liaison hydrogène, etc.

Les éléments dont les atomes ont des enveloppes externes d'une configuration analogue auront un comportement chimique voisin. Cela explique l'existence des grandes familles expérimentales d'éléments : les alcalins, les alcalino-terreux, les halogènes, les gaz rares, les métaux de transition, etc. Mendéléïev a mis en évidence cette parenté en classant les éléments selon l'ordre croissant des numéros atomiques ♦. Chaque colonne du tableau ainsi établi correspond à l'une des grandes familles d'éléments. La signification profonde de cet ordonnancement expérimental apparut grâce à la connaissance des structures atomiques : les éléments d'une même colonne ont une couche électronique externe de structure identique. Toutes les nuances de ce tableau, comme l'étrange similitude chimique des terres rares ♦ ou des actinides ♦, s'expliquent parfaitement par l'étude de ces couches électroniques. Mendéléïev ignorait cette signification profonde, mais il avait la conviction qu'une loi de ce type sous-tendait les constatations expérimentales dont s'inspirait sa classification. Il n'a donc pas hésité à laisser des cases blanches, sûr que les recherches ultérieures amèneraient la découverte d'éléments nouveaux, qui viendraient combler ces vides. Les principales propriétés chimiques de ces éléments inconnus ont même pu être prédites et l'expérience n'a fait que confirmer ces prévisions.

LES GRANDES LOIS DE LA CHIMIE

Les anciennes lois expérimentales, énoncées par les chimistes du passé, s'expliquent parfaitement par la connaissance des mécanismes submicroscopiques qui régissent le comportement chimique des corps. Ainsi, la loi de la conservation des éléments (à travers toutes les réactions possibles, le nombre et la nature des atomes engagés dans les combinaisons restent les mêmes) se traduit en particulier par la loi de conservation des masses de Lavoisier.
La loi des proportions définies en poids de Proust (dans une réaction chimique, les proportions en poids des éléments qui se combinent sont constantes) devient évidente. Il en est de même pour la loi des proportions multiples de Dalton : quand deux éléments peuvent

♦ Le problème de la stabilité d'un édifice moléculaire ou cristallin ainsi formé se traite sur le plan théorique par la résolution des équations de Schrödinger dont mention a été faite à propos des systèmes électroniques d'un atome. Bien entendu, le cas des structures intéressant les électrons de plusieurs atomes est encore plus complexe que celui d'un atome isolé. La résolution ne peut se faire que par approximation. On a pu traiter progressivement le cas de molécules comme le méthane, ce qui a permis de justifier théoriquement la structure tétraédrique, déduite d'autres expériences, de l'atome de carbone. On a pu de même traiter le cas des liaisons doubles et triples et conclure à l'existence de types différents d'orbitales moléculaires.

♦ En fait, Mendéléïev a classé les éléments par ordre des masses atomiques croissantes. Il se trouve que les deux classements coïncident (à quelques exceptions près). Voir Classification périodique et le tableau, pages 42 et 43.

♦ Terres rares : éléments, aussi appelés lanthanides, qui sont ceux qui suivent immédiatement le lanthane dans la classification périodique. Ce sont les éléments portant les numéros atomiques 58 à 71. Leurs propriétés chimiques sont très voisines.

♦ Actinides : éléments suivant immédiatement l'actinium dans la classification périodique. Ils portent les numéros 89 à 103. Ce sont les éléments artificiels à partir du numéro 93 (éléments transuraniens).

réagir ensemble en donnant, selon les circonstances, des composés différents, les diverses masses de l'un qui se combinent à une même quantité de l'autre sont entre elles dans le rapport de deux nombres entiers (ce qui traduit simplement que les molécules sont composées d'un nombre entier d'atomes de chaque espèce ; ainsi, dans les deux oxydes, cuivreux et cuivrique, la quantité de cuivre qui se combine à une même quantité d'oxygène est, dans le second cas, la moitié de celle qui réagit dans le premier cas). La loi de Richter, qui est une généralisation de celle de Dalton, s'explique de manière analogue.

Enfin, les lois des combinaisons entre gaz, énoncées par Gay-Lussac (si les éléments entrant en réaction sont gazeux, les volumes de ces gaz qui se combinent sont dans un rapport simple entre eux et avec le volume du composé formé dans la réaction si ce dernier est aussi un gaz), découlent directement de la théorie atomique, compte tenu de la théorie cinétique des gaz. Ainsi, il faut un volume de chlore qui, en se combinant à un volume identique d'hydrogène, donnera deux volumes de gaz chlorhydrique ; trois volumes d'hydrogène réagissent avec un volume d'azote pour former deux volumes d'ammoniac, etc.

MÉTHODES DE DÉFINITION DES STRUCTURES MOLÉCULAIRES ET LEURS RÉSULTATS

Puisque les propriétés macroscopiques de tous les corps s'expliquent par la connaissance de leur structure intime, moléculaire ou cristalline, il importe de pouvoir appréhender ces structures fines. Le plus souvent, cette connaissance s'obtient par des méthodes indirectes.

Microscopie électronique et spectres de rayons X

En effet, l'échelle des phénomènes atomiques est trop petite pour que l'on puisse les observer directement, quel que soit le grossissement des microscopes optiques. La longueur d'onde de la lumière visible (4 000 à 8 000 angströms ♦) est mille fois plus grande que le diamètre d'un atome lourd. Les microscopes électroniques, utilisant des ondes de longueur bien plus faible (les rayons gamma ont des longueurs d'onde inférieures à un centième d'angström) ont permis d'observer les molécules les plus grosses ; enfin, les microscopes à effet de champ ont des grossissements supérieurs à un million et, dans des cas exceptionnels, permettent de « voir » la place exacte d'atomes à l'intérieur d'un édifice. Cependant, l'emploi de méthodes physiques diverses a permis depuis des années de préciser de nombreuses structures, en particulier pour les corps cristallisés. Ainsi, résultant des travaux de Bragg, les diagrammes pris à l'aide de

♦ 1 angström (Å) = 10^{-4}

rayons X sont d'une grande fertilité. Les taches qui résultent de la réfraction des rayons incidents par les différents plans du réseau cristallin sont interprétées, le plus souvent à l'aide d'ordinateurs (seuls capables d'effectuer rapidement les calculs complexes et fastidieux que nécessite la détermination d'une structure un peu complexe). Un des cas les plus intéressants a été la détermination de la structure de certaines protéines d'intérêt vital, comme les acides nucléiques, la pénicilline, etc. Non seulement les positions relatives et les distances des divers constituants de la molécule peuvent être précisés, mais encore on obtient une image de la répartition des électrons périphériques aux divers sites de la molécule. De véritables cartes de densités électroniques moyennes sont dressées et permettent d'interpréter le comportement du corps dans des conditions données.
Il n'est toutefois pas possible de préciser, à l'aide de rayons X et gamma, la position d'atomes très légers, comme ceux d'hydrogène, dont le rôle est pourtant fort important dans les édifices organiques. On a pu pallier ce défaut par l'utilisation de la diffraction de faisceaux de neutrons, plus sensibles au choc contre les atomes légers.

Spectroscopie « traditionnelle » et méthodes modernes

D'autres méthodes, toujours empruntées à la physique, permettent de préciser aussi la nature des liaisons qui unissent les divers constituants d'une molécule, atomes particuliers ou groupes d'atomes. Ainsi, les méthodes spectrales ont un intérêt traditionnel. Certains spectres (spectres de raies) d'émission donnent des indications sur les atomes eux-mêmes ; on utilise les spectres de bandes pour approfondir les structures moléculaires. Les changements internes dans une molécule entraînent des variations énergétiques et se traduisent par une modification des spectres que l'on obtient. Progressivement, on a pu attribuer à des détails caractéristiques de la structure moléculaire des particularités des spectres correspondants. La présence de ces détails dans le spectre d'un composé inconnu renseigne rapidement sur certains aspects de sa constitution. De même, les spectres Raman ♦, découverts par ce savant en 1928, utilisent la diffusion de la lumière (visible ou ultraviolette) monochromatique : on trouve dans la lumière diffusée par le corps étudié des fréquences supplémentaires qui traduisent les vibrations et les rotations internes de la molécule.
Ces résultats sont recoupés par d'autres méthodes physiques, comme l'étude de la résonance paramagnétique électronique et surtout de la résonance magnétique nucléaire ♦, méthode datant de 1946. On trouve là des outils perfectionnés permettant une étude fine, en particulier des liaisons entre les atomes voisins. Chaque groupe, chaque radical constitutif fournissent des fréquences caractéristiques et l'on parvient à dresser des images très détaillées de la molécule.

♦ Raman : savant d'origine indienne ayant travaillé à Paris entre les deux guerres.

♦ La résonance magnétique nucléaire, outil favori des organiciens de cette décennie, se fonde sur le fait que, de façon analogue aux électrons, la plupart des noyaux atomiques peuvent posséder un spin, et donc un moment magnétique. Ils sont donc sensibles à l'action d'un champ magnétique extérieur dont la présence crée des sous-niveaux énergétiques différents. Le passage du noyau d'un sous-niveau à un autre se fait avec absorption ou émission de rayonnement. Le fait important est que la structure même d'une molécule provoque des champs locaux qui se superposent au champ extérieur, créant des différences de champ dans la molécule. Les fréquences de résonance de chaque noyau sont ainsi influencées par la nature des liaisons chimiques entre l'atome étudié et les groupements voisins. Dans le spectre d'absorption du corps étudié, outre les raies correspondant au passage de chaque noyau doté d'un spin d'un niveau énergétique à l'autre, il apparaît une structure plus fine, due à ces variations locales du champ au sein de la molécule. Ces nouvelles raies, comparées à celles d'un atome « non perturbé » par son voisinage, renseignent de façon spécifique sur les groupements d'atomes qui les ont provoqués. On connaît ainsi, en chimie organique en particulier, les images de toutes les grandes fonctions, ce qui permet de tirer des conclusions précises et sûres sur la structure de la molécule soumise à l'expérience.

Édifices moléculaires

A la suite de telles recherches, il a été possible de préciser la façon dont les atomes sont disposés, liés et entourés d'électrons dans la plupart des composés classiques. On sait, par exemple, que la molécule d'eau est plane et forme un triangle ; on connaît la distance entre les atomes d'hydrogène et celui d'oxygène et l'angle formé par les deux liaisons O — H. La plupart des phénomènes physiques et chimiques affectant l'eau, les caractéristiques très particulières de ce liquide universel s'expliquent par cette connaissance (pourtant, et c'est là que la nature montre soudain sa malice, les savants ont été dernièrement déroutés par la découverte d'une eau « bizarre », polymérisée, par le Soviétique B. Deriaguine ♦...). On sait de même que la molécule d'ammoniac (NH_3) est tétraédrique, alors que celle de formaldéhyde (CH_2O) est plane, que les molécules de gaz carbonique sont linéaires, etc. Mais c'est en chimie organique, avec son étonnante richesse et la grande complexité de ses composés supérieurs, que l'étude des structures a été la plus fertile. Il a été possible de vérifier l'hypothèse du carbone tétraédrique : les quatre liaisons de covalence que cet atome fondamental de la chimie organique met en jeu sont dirigées vers les sommets d'un tétraèdre dont le carbone occupe le centre. Il a été possible de suivre l'enchaînement de tels tétraèdres en de longues molécules en zigzags (d'angle au sommet égal à 109°28′) que sont les squelettes carbonés des carbures aliphatiques ♦. Il a été possible aussi de préciser la distance séparant deux atomes de carbone quand ils sont unis par une liaison simple, double ou triple. On sait que la distance carbone-oxygène est de 1,49 Å pour la fonction alcool, alors qu'elle représente 1,13 Å dans les cétones ♦. On a « visualisé » et confirmé les hypothèses de Le Bel ♦ ou de Kékulé ♦ sur la structure des molécules organiques. Leurs déductions, obtenues par l'examen attentif des propriétés chimiques de ces corps, ont trouvé une confirmation grâce à la physique.

♦ Boris Deriaguine : chimiste russe contemporain ayant récemment annoncé la découverte d'une variété particulière d'eau, polymérisée par passage dans de fins capillaires. Cette découverte a suscité une vive discussion.

♦ Carbures aliphatiques (ou paraffines) : carbures d'hydrogène, de formule générale $C_n H_{2n+2}$, caractérisés par une molécule à chaîne linéaire saturée. Le premier terme en est le méthane CH_4 et cette série contient des corps comme le butane ($C_4 H_{10}$) et les constituants des carburants.

♦ Cétones : corps de formule

$$R-\underset{\underset{O}{\|}}{C}-R',$$

R étant un radical aliphatique. La plus connue est l'acétone, de formule

$$CH_3-\underset{\underset{O}{\|}}{C}-CH_3.$$

♦ Achille Le Bel : chimiste français, mort en 1930, spécialiste de la stéréochimie, doué d'une grande finesse de raisonnement.

♦ Frédéric Kékulé : chimiste allemand de la fin du siècle dernier qui a introduit les formules développées en chimie organique.

Représentations moléculaires conventionnelles

Pour connaître et pour comprendre les propriétés d'une molécule, particulièrement en chimie organique où plusieurs dispositions sont presque toujours possibles, il ne suffit pas de donner une liste d'atomes qui la composent. Il faut indiquer la façon dont ces atomes sont agencés. Les formules dites « développées » sont une approximation moins grossière que les formules brutes, mais ce n'est, dans le meilleur des cas, qu'une représentation schématique plane d'une structure à trois dimensions. Dans le cas des molécules un peu complexes, il devient nécessaire de faire appel à des modèles tridimensionnels pour rendre compte de la position relative des différentes

parties de la molécule. Encore ces modèles sont-ils statiques, alors que la molécule réelle vibre, pivote et oscille sans répit entre plusieurs états mésomères.
Nos représentations conventionnelles les plus perfectionnées sont plus éloignées de la réalité que ne le sont les photos des êtres vivants de ces derniers. Néanmoins, dans les deux cas, il s'agit d'identifier l'objet de façon indubitable plutôt que de tout apprendre sur lui.

LA RÉACTION CHIMIQUE

Réactions d'équilibre et réactions totales

Lorsque deux corps sont mis en présence et qu'ils réagissent pour former de nouvelles combinaisons, plusieurs cas sont possibles. Parfois, la réaction se poursuit jusqu'à ce que l'un des constituants soit complètement épuisé : l'allumette peut brûler dans l'air tant que le bois n'est pas entièrement consumé, le clou est attaqué par l'acide chlorhydrique jusqu'à sa disparition complète, etc. On dit que la réaction est totale. Dans d'autres cas, la réaction s'arrête avant qu'aucun des constituants soit consommé : la réaction est alors partielle, limitée. Le plus souvent, les réactions limitées aboutissent à des états d'équilibre statistique : en même temps que la réaction étudiée a lieu, la réaction inverse se produit et, à un certain moment, le rythme des deux réactions antagonistes coïncide : il se forme à tout moment autant de molécules nouvelles d'un constituant qu'il en disparaît. On dit que la réaction est réversible ; à notre échelle macroscopique, il ne se passe rien : le système est en équilibre. En fait, d'incessants échanges ont lieu entre les molécules. En utilisant des radio-isotopes ♦ dont on peut suivre la distribution dans la masse des corps en présence, on a pu mettre cette dynamique en évidence. Ainsi, la synthèse d'ammoniac à partir d'azote et d'hydrogène est une réaction d'équilibre. Dans certaines conditions de pression et de température, que l'on parte d'un mélange des deux éléments constitutifs d'ammoniac ou bien de ce gaz pur, on obtient un mélange identique des trois corps. L'équilibre est atteint quand la vitesse de la synthèse est égale à celle de la dissociation. Cela s'écrit :
$N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_3$.

♦ Radio-isotopes : isotopes instables de certains éléments, souvent obtenus artificiellement, et qui émettent un rayonnement qui permet de les localiser

Lois de Le Châtelier

De tels équilibres peuvent être déplacés vers la synthèse ou vers la dissociation (on dit « vers la droite » ou « vers la gauche ») par un changement des conditions opératoires, en particulier de la pression et de la température. Ainsi, les réactions qui se passent entre gaz (comme c'est le cas de notre exemple) et qui aboutissent à une contraction du volume final sont avantagées par une augmentation

de la pression. Dans la synthèse de l'ammoniac, on passe de quatre volumes gazeux à deux ; la synthèse est plus poussée si la pression augmente. Au contraire, dans les gaz raréfiés, la dissociation va prédominer. D'autre part, les réactions chimiques ont presque toujours lieu avec un dégagement ou une absorption de chaleur : on dit qu'elles sont exothermiques ou endothermiques. Dans le cas des réactions d'équilibre, les réactions endothermiques sont favorisées par l'élévation de la température, tandis que leurs antagonistes qui dégagent de la chaleur sont plus poussées si la température décroît.
Ces lois sont appelées lois de Le Châtelier : un système chimique réagit à une modification des conditions extérieures en s'opposant au changement : il dégage de la chaleur quand on le refroidit, il se contracte lorsqu'on le comprime, etc. Il en résulte que si, dans une réaction d'équilibre entre le gaz, le volume des constituants de gauche est égal à celui des constituants de droite, une modification de la pression n'aura pas d'influence sur l'équilibre final.

Loi d'action des masses

Le point d'équilibre d'un système dépend aussi de l'abondance relative de ses constituants : l'équilibre est déplacé de façon à consommer le maximum du constituant qui se trouve en surabondance. C'est encore une manifestation de la tendance des systèmes chimiques à s'opposer aux changements. Ainsi, si dans un récipient où s'opère une synthèse d'ammoniac $N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_2$ et où l'équilibre a été atteint, on introduit soudain un excès d'azote sans rien changer d'autre, il se formera une nouvelle quantité d'ammoniac pour consommer en partie cet azote excédentaire. Si l'excès d'azote est grand, on peut aboutir à la disparition pratiquement totale de l'hydrogène initialement présent ; tout se passe alors comme si la réaction avait été totale. Mais, dès que l'on se rapproche des conditions stoechiométriques ♦ en soutirant de l'azote au mélange, le caractère équilibré de la réaction se manifeste à nouveau et de l'hydrogène apparaît par dissociation d'ammoniac. ♦ Voir page 108.
Cette influence de la concentration relative de chaque constituant d'une réaction d'équilibre est connue sous le nom de loi d'action des masses (formulée par Guldberg et Waage il y a cent ans). Cette loi est quantitative ; elle permet de calculer le point d'équilibre d'un système dont les constituants sont en des proportions connues et dont les conditions physiques ne changent pas au cours de l'expérience. Ainsi, la réaction symbolisée $mA + nB \rightleftharpoons m'A' + n'B'$ a un équilibre régi par la formule $\frac{[A']^{m'}\,[B']^{n'}}{[A]^{m}\,[B]^{n}} = K_c$ (les termes entre crochets sont les concentrations des constituants correspondants dans le système en équilibre). Cette formule est tout à fait exacte

pour des réactions entre gaz « parfaits » (où les molécules n'interagissent pas entre elles) ou pour des solutions très diluées. Elle est encore valable pour la plupart des cas réels de gaz et de solutions ; on peut même l'appliquer dans certains cas à des systèmes comportant plusieurs phases (mélanges de gaz, de liquides et de solides).

Pour les gaz, la loi d'action des masses peut s'exprimer de manière analogue en fonction des pressions partielles des différents constituants :

$$\frac{p_{(A')}^{m'}\, p_{(B')}^{n'}}{p_{(A)}^{m}\, p_{(B)}^{n}} = K_p\,.$$

Dans cette relation, $p_{(A)}$ est la pression partielle du constituant A dans le mélange lorsque l'équilibre est atteint, $p_{(A')}$ est celle du constituant A', etc. K_p est alors la constante d'équilibre relative aux pressions partielles.

Bien entendu, pour les gaz, on peut écrire la loi d'action des masses aussi bien en la rapportant aux pressions partielles qu'aux concentrations. Il y a une relation simple entre K_c et K_p. On démontre en thermodynamique que $K_p = K_c\,(RT)^h$, où T est la température absolue, alors que h désigne l'ensemble des exposants :

$$h = (m' + n') - (m + n).$$

On démontre par ailleurs que K_p ainsi que K_c dépendent de la température ; cette variation suit la loi suivante :

$$\frac{d\,(\mathrm{Log}\,K_p)}{dT} = \frac{\Delta H}{RT^2}\,.$$

H est une fonction thermodynamique appelée enthalpie ♦ ; sa variation, ΔH, représente la chaleur dégagée ou absorbée lors de la réaction se déroulant à pression constante. On voit que K_p augmente en même temps que croît la température si ΔH est positif, c'est-à-dire si la réaction se déroule dans le sens endothermique ♦ ; K diminue si la réaction se déroule dans le sens inverse. On retrouve ainsi l'expression mathématique de la loi du déplacement de l'équilibre sous l'influence de la température. Un calcul analogue peut être fait pour la constante K_c relative aux concentrations. Dans l'expression de la loi de variation de K_c, la chaleur à pression constante est remplacée par celle qui se manifeste lors de l'opération à volume constant. Cette loi a reçu le nom du savant hollandais Van't Hoff ♦.

♦ Voir Fonctions d'état.

♦ C'est-à-dire si la réaction absorbe de la chaleur.

♦ Il existe une autre loi de Van't Hoff, relative aux phénomènes d'osmose.

CINÉTIQUE CHIMIQUE

Influence de la température

Les problèmes des réactions équilibrées n'interfèrent pas avec un autre aspect des réactions chimiques : la vitesse de ces dernières. En effet, certaines réactions (totales ou équilibrées) sont pratiquement

instantanées : dès que les constituants sont en présence, le résultat final est atteint. Dans d'autres cas, la réaction est lente, qu'elle soit totale ou limitée. Dans ce cas, une élévation de la température suffit à accélérer la réaction dont la vitesse double pratiquement tous les dix degrés. Reprenons notre synthèse de l'ammoniac. La réaction est exothermique ; si l'on refroidit le mélange réactionnel, l'équilibre est déplacé de façon à former plus d'ammoniac. Il serait donc plus favorable dans l'industrie, où l'on cherche à produire de l'ammoniac, d'opérer à des températures plus basses. Mais la réaction de synthèse n'est pas instantanée ; plus on refroidit, plus il faut de temps pour que l'équilibre théorique soit effectivement atteint. On perd d'un côté ce que l'on espérait gagner de l'autre. Dans la pratique, on se contente d'un compromis calculé. A la limite, à une température suffisamment basse, une réaction peut avoir une vitesse pratiquement nulle. Rien ne semblera se produire alors. C'est le cas des équilibres métastables.
L'influence de la température sur la vitesse des réactions est logique. A l'échelle moléculaire, pour que la réaction se produise, il faut que les molécules qui y participent entrent en contact ; une élévation de la température accélère les molécules qui subissent alors plus de chocs entre elles durant un laps de temps donné et ont ainsi plus d'occasions de réagir, comme de subir l'activation indispensable.

La catalyse

Un autre moyen d'accélérer certaines réactions est d'introduire dans le milieu réactionnel un catalyseur. Il s'agit là de substances qui, sans intervenir apparemment dans la réaction (car on les retrouve intactes à la fin de l'opération) et sans déplacer l'équilibre, permettent d'atteindre plus vite l'état final. Les catalyseurs ont souvent une action sélective et favorisent alors l'accélération d'une réaction particulière. Parfois, ils agissent d'une façon plus générale, accélérant, par exemple, des oxydations ou des hydrogénations de substances diverses. On distingue classiquement des catalyseurs agissant en phase homogène (qui, le plus souvent, participent à la réaction qu'ils catalysent en formant des composés intermédiaires mais qui se reforment sans pertes à la fin du cycle) et des catalyseurs en phase hétérogène, le plus souvent solides, qui favorisent des réactions entre fluides grâce à des particularités de leur surface dont les anfractuosités permettent aux molécules antagonistes de se rapprocher à des distances favorables à la réaction. Il existe d'autres mécanismes de la catalyse.

♦ Plomb tétraéthyle : composé de formule $Pb(C_2H_5)_4$, qui est ajouté à l'essence dont il empêche l'inflammation spontanée dans les cylindres d'un moteur et augmente l'indice d'octane.

L'inhibition est une « catalyse négative »

De la même façon que les catalyseurs accélèrent certaines réactions, il existe des catalyseurs négatifs, qui ralentissent le déroulement de combinaisons chimiques. Il s'agit d'inhibiteurs, dont le plomb tétraéthyle ♦ est l'un des plus connus. Généralement, et contrai-

rement aux catalyseurs, les inhibiteurs sont consommés au cours de leur action. Ils forment, en effet, des composés stables avec certains corps intermédiaires apparaissant au cours de la réaction qu'ils inhibent, interrompant ainsi le déroulement de la réaction en cause.

Des catalyseurs biologiques : les enzymes

Les catalyseurs les plus efficaces et les plus spécifiques appartiennent au monde vivant et à la biochimie. En effet, les enzymes parviennent à rendre possible le déroulement de réactions avec des vitesses acceptables à des températures auxquelles ces réactions auraient autrement une vitesse pratiquement nulle. Ainsi, les combustions, qui, dans notre esprit, sont des réactions brutales, qui s'accomplissent à des températures élevées, s'effectuent dans les êtres vivants, plantes et animaux, à des températures inférieures à 40°C, de façon lente et régulière, apportant à l'organisme l'énergie dont il a besoin continuellement.

La catalyse a une grande importance industrielle

Les catalyseurs ont pris, dans la chimie d'aujourd'hui, une importance exceptionnelle. Ils sont présents dans de nombreuses opérations de synthèse, en particulier lors des élaborations industrielles. Ils permettent en particulier, grâce à leur action sélective, de favoriser une réaction particulière parmi toutes celles qui sont possibles dans un milieu réactionnel donné, améliorant les rendements des synthèses intéressantes. A titre d'exemple, les catalyseurs comme ceux de Ziegler ou de Natta ♦ permettent d'obtenir de longues chaînes de polymères organiques parfaitement régulières et dont les molécules ont une orientation spatiale précise (polyéthylènes et polypropylènes isotactiques ♦), améliorant les qualités des matériaux obtenus. Ainsi, bien qu'ils n'agissent qu'en accélérant des réactions qui sont thermodynamiquement possibles, sur le plan pratique les catalyseurs rendent parfois les mêmes services que s'ils provoquaient des réactions impossibles autrement.

Enfin, il arrive parfois que, dans une réaction donnée, les produits de celle-ci aient une action catalytique sur le déroulement du processus : la réaction s'accélère ou se ralentit dès qu'apparaît une quantité appréciable de composés de droite ♦. On dit alors que la réaction est autocatalysée. C'est souvent le cas des réactions dites en chaîne, qui peuvent devenir explosives.

♦ Karl Ziegler : chimiste allemand contemporain. Giulio Natta : chimiste italien. Leurs travaux ont été couronnés par un prix Nobel en 1963 et ont abouti à d'importantes applications industrielles.

♦ Les catalyseurs spécifiques comme ceux de Ziegler ou de Natta permettent non seulement de favoriser la synthèse de longues macromolécules par enchaînement de petites « briques » de monomère de base, mais aussi d'ordonner très rigoureusement ces molécules dans l'espace. En particulier, les ramifications latérales ne se disposent pas de façon chaotique, mais respectent un ordre précis. On obtient, selon l'orientation respective de ces ramifications, des polymères dits isotactiques syndiotactiques, etc., selon la disposition de ces ramifications.

Ordre d'une réaction

Si deux composés, A et B, réagissent ensemble, par exemple selon le schéma $mA + nB \longrightarrow sC$, on constate que la vitesse v de cette réaction dépend généralement des concentrations moléculaires ♦ des réagissants. La loi qui régit la vitesse est de la forme : $v = K[A]^p[B]^q$, où [A] et [B] sont les concentrations moléculaires,

♦ Voir page 117.

♦ On appelle ainsi les concentrations exprimées en nombre de molécules par unité de volume réactionnel.

et où K est une constante qui dépend de la température. Les exposants p et q sont expérimentaux. Leur somme est appelée ordre de la réaction. L'ordre de la réaction traduit les mécanismes intimes de la réaction et les rencontres entre les molécules indispensables pour que celle-ci ait lieu. Théoriquement, on pourrait croire que l'ordre $(p + q)$ doit être égal à la somme $(m + n)$ de molécules dont le contact semble nécessaire à la réaction. En fait, les mécanismes intimes ne sont jamais aussi simples que le laisserait prévoir l'écriture globale de la réaction : il se forme souvent des composés intermédiaires, instables, qui évoluent à leur tour pour donner les produits définitifs. La réaction apparemment simple de chlore sur l'hydrogène se décompose en fait ainsi :

$Cl_2 \longrightarrow Cl + Cl$;

$Cl + H_2 \longrightarrow ClH + H$;

$H + Cl_2 \longrightarrow ClH + Cl$, etc.

La vitesse de la réaction globale, telle qu'elle nous apparaît en fin de compte, est régie en fait par la plus lente de ces réactions intermédiaires. Cependant, il existe des réactions simples, pour lesquelles l'ordre est bien celui qui résulte de la molécularité. Ainsi, la dissociation de l'hydrogène arsenié, AsH_3, qui ne fait intervenir qu'une seule molécule, est du premier ordre : il existe des réactions faisant intervenir deux molécules à la fois et qui sont effectivement de second ordre. L'ordre pratique d'une réaction peut être fractionnaire et même nul : dans ce dernier cas, la concentration n'a pas d'influence sur la vitesse de la réaction.

Activation

Au-delà de l'écriture globale des réactions, l'étude cinétique est dans l'obligation d'en saisir le schéma et le mécanisme pour comprendre ce qui régit en fait la vitesse du processus global. Parmi les phénomènes importants, il faut citer celui d'activation des molécules ; on admet que, pour réagir, il faut que la molécule quitte son état de repos (qui correspond à sa forme stable et à l'énergie la plus basse possible) et qu'elle soit activée. Les mécanismes d'activation sont multiples, mais ils reviennent à fournir à la molécule un supplément d'énergie. Cela peut se faire soit par un choc, soit par un apport de lumière, d'électrons externes, etc.

LES APPORTS DE LA THERMODYNAMIQUE A LA CHIMIE

Thermodynamique et chimie

En général, les réactions chimiques s'accompagnent d'un dégagement ou d'une absorption de travail par le système, sous la forme de chaleur. Dans le premier cas, elles sont dites exothermiques ; dans

le second, elles sont endothermiques. Bien entendu, si une réaction est exothermique et si la réaction inverse est possible, cette dernière est endothermique. Les quantités de chaleur mises en jeu varient largement d'une réaction à une autre (tout en restant dans un même ordre de grandeur). Certaines sont pratiquement athermiques, comme la formation des esters ♦ en chimie organique. La thermicité d'une réaction n'est pas liée à sa vitesse ; la combustion brutale d'un kilogramme de sucre fournit pratiquement la même quantité de calories que son oxydation lente dans les organismes vivants. Dans des conditions physiques particulières, la chaleur d'une réaction et la chaleur de formation d'un composé sont constantes. Grâce au premier principe de la thermodynamique, on peut calculer les chaleurs mises en jeu dans des réactions inaccessibles à la mesure directe, en manipulant les chaleurs de formation des divers composés intervenant dans la réaction.

♦ Voir ce mot.

Affinité chimique

Les tendances des divers corps à réagir entre eux avec plus ou moins de facilité ont amené la notion d'« affinité chimique », notion imprécise, malgré les travaux de Berthelot ♦, jusqu'aux conclusions de la thermodynamique moderne. Cette notion est clarifiée et fait actuellement l'objet de mesures précises.

♦ Marcelin Berthelot (1827-1907) : grand chimiste français ayant fait avancer de nombreux domaines de la chimie, en particulier la synthèse organique et la thermochimie. Il a été également ministre de l'Instruction publique et des Affaires étrangères.

Comme la plupart des phénomènes, les réactions chimiques se divisent en deux catégories : celles qui sont spontanément possibles et celles qui sont « antinaturelles », qui exigent pour se faire un apport d'énergie extérieure. Très approximativement, on peut dire que les réactions chimiques sont une manifestation d'une sorte d'énergie potentielle contenue dans la matière : celles qui se produisent spontanément s'accompagnent d'une diminution de cette énergie potentielle. L'exothermicité peut être une manifestation de cette décroissance d'énergie du système. C'est une illustration de ce que l'on a décrit comme une tendance universelle vers l'ordre et vers le repos.

La thermodynamique examine les transformations diverses de systèmes matériels, y compris les systèmes chimiques, mettant en jeu les transformations d'énergie contenue dans ces systèmes. Elle schématise les phénomènes réels, introduisant des notions de systèmes fermés, d'opérations parfaitement réversibles (dont les opérations réelles ne sont que des approximations), d'équilibres. Pour décrire l'état et l'évolution d'un système, elle fait appel à des notions abstraites comme l'énergie interne, l'enthalpie, l'entropie, l'énergie libre et l'enthalpie libre ♦. Ces grandeurs sont liées entre elles ; seules, l'énergie interne et l'entropie sont des grandeurs fondamentales.

♦ Voir Fonctions thermodynamiques.

Lors d'une réaction chimique, si celle-ci se fait en gardant constant le volume réactionnel, la chaleur de la réaction est égale à la variation de l'énergie interne. Si c'est la pression qui reste constante, la chaleur

de la réaction traduit la modification de l'enthalpie du système. Quand on opère à température et volume constants, c'est la variation de l'énergie libre qui correspond au travail maximal mis en jeu durant la réaction. Si l'on travaille à température et pression constantes, c'est au contraire l'enthalpie libre qui varie et sa variation est égale au travail maximal mis en jeu.

L'énergie libre diminue au cours d'une réaction spontanée

Or la convention thermochimique veut que l'affinité d'une réaction soit précisément mesurée par le travail maximal mis en jeu durant celle-ci. Dès lors, selon les conditions opératoires, les variations d'énergie libre ou d'enthalpie libre mesurent l'affinité chimique. Les réactions spontanément possibles sont celles qui se font avec diminution d'énergie libre et d'enthalpie libre. Dans le cas particulier de réactions réversibles ayant atteint l'équilibre, l'affinité est nulle. Une modification des conditions physiques, en particulier de la température, peut changer les caractéristiques thermodynamiques d'un système au point de rendre spontanément possibles des réactions qui nécessitent un apport de travail extérieur dans d'autres conditions. Toutes les lois de déplacement d'équilibres chimiques s'interprètent par la thermodynamique qui, par ailleurs, a dressé des tables d'affinités chimiques permettant de prévoir, dans des conditions précises, le déroulement de réactions chimiques.

Potentiels d'électrode ; oxydo-réductions

Si une réaction chimique peut être utilisée directement à la production d'électricité dans une pile réversible, le travail fourni par la pile est égal à la diminution de l'enthalpie libre qui accompagne la réaction. La mesure des différences de potentiel livre alors une indication directe de l'affinité chimique attachée à la réaction. On a pu généraliser ce mode opératoire. Il est pratique pour toute une série de réactions ioniques, faisant intervenir des échanges d'électrons ♦.

♦ Pour chaque réaction, le potentiel mesuré entre les électrodes dépend de plusieurs facteurs : la température, les concentrations, le nombre de valences mises en jeu dans la réaction. Cette variation peut se calculer thermodynamiquement grâce à une formule due à Nernst et dont l'expression est la suivante :

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \text{Log } C.$$

Dans cette formule, T est la température absolue ; n, le nombre de valences mises en jeu, et C le rapport des concentrations des constituants des deux membres de la réaction. F représente une certaine quantité d'électricité, un « Faraday ». Quand, en appliquant cette formule, on pose C = 1, on obtient le potentiel normal de la réaction considérée. A température fixe, E_0 est ainsi une grandeur caractéristique de la réaction considérée.

Les réactions d'oxydo-réduction se résument à des échanges d'électrons

En particulier, les phénomènes d'oxydation et de réduction classiques sont des réactions d'échanges électroniques : lors d'une oxydation, le corps oxydé (élément ou composé) cède des électrons qui sont fixés par les atomes d'oxygène qui s'y combinent. Comme les oxydations sont des réactions courantes et qu'elles caractérisent un mécanisme général de réactions du même type, on a appelé par extension « oxydation » toutes les réactions faisant intervenir une cession d'électrons par le corps oxydé. Les « réductions » sont, réciproquement, toutes les réactions inverses de capture d'électrons. Si un corps peut prendre deux formes, l'une oxydée, l'autre réduite selon ces critères d'échanges électroniques, on peut écrire :

$Ox + ne \rightleftarrows$ *réd.* ♦.

♦ *Ox :* oxydant ;
ne : nombre d'électrons échangés ;
réd. : réducteur.

La méthode de mesure de potentiels d'électrode pour définir les affinités chimiques est souvent applicable aux réactions d'oxydo-réduction. La mesure se fait par rapport à une électrode de référence (électrode d'hydrogène, correspondant à la transformation de l'atome neutre H en proton H^+). L'étude de ces potentiels se révèle d'une grande fertilité, jusque dans les réactions subtiles et complexes de biochimie ♦.

♦ On a ainsi établi des tables des potentiels d'oxydo-réduction pour toutes les réactions élémentaires. Par définition, la réaction $2\,H^+ + 2e \rightleftarrows H_2$ correspond à un potentiel nul ; la gamme va de la réaction : $Li^+ + e \rightleftarrows Li$ (à laquelle correspond un potentiel d'électrode de — 3,04 volts) à la réaction : $F_2 + 2e \rightleftarrows 2F^-$ (à laquelle correspond un potentiel de — 2,6 volts).

Acides et bases

La réflexion précédente a conduit à définir brièvement la notion d'oxydo-réduction. Il est important de mentionner une autre notion importante : celle des acides et des bases.
Traditionnellement, l'acidité était définie comme une fonction commune à une série de composés minéraux et organiques ayant le même comportement face aux réactifs colorés, face aux bases, etc. De même, les bases : soude, lithine, chaux, potasse étaient unies par une notion de « causticité » commune.

Les réactions acido-basiques sont des échanges de protons

Après les travaux d'Arrhenius sur la dissociation des acides en solution dans l'eau en des cations H^+ et en des anions dépendant de la nature de l'acide : $HA \rightleftarrows H^+ + A^-$ (solution aqueuse), les travaux de Brönsted-Lowry ont abouti à une définition assez générale et qui, de plus, est symétrique pour les acides et pour leurs antagonistes basiques. Cette conception définit comme acides tous les corps capables d'émettre des cations H^+. Les bases sont, symétriquement, tous les corps capables de capter ces mêmes ions H^+ (il y a là une différence par rapport aux idées traditionnelles qui considéraient comme bases les composés capables d'émettre des ions OH^- en solution dans l'eau). Ces nouvelles définitions s'appliquent d'une façon générale et ne sont plus limitées au cas des solutions aqueuses. D'autre part, les acides et les bases sont désormais tous associés par couples ; dans la réaction mentionnée plus haut, HA et A^- forment un tel couple. Ainsi, l'acide chlorhydrique est un acide ; la base qui lui correspond est l'anion Cl^-. Il s'établit toujours un équilibre entre les formes acide et basique ; cet équilibre est déplacé vers la forme acide ou vers la forme basique selon le coefficient de la dissociation. Si ce coefficient K est élevé, on dit que l'acide est fort :

$$K = \frac{[A^-]\,[H^+]}{[AH]} ♦.$$

♦ Dans la pratique, on utilise souvent le cologarithme de K, appelé *p*K, qui caractérise chaque couple acide-base (le cologarithme est le logarithme changé de signe).

Le potentiel hydrogène (pH)

Indépendamment de la force de l'acide utilisé, il est pratiquement important de connaître l'acidité de la solution utilisée, sa concen-

tration en ions H^+. Cette concentration est repérée par une grandeur commode, appelée le pH (potentiel hydrogène) de la solution et qui est le cologarithme de la concentration molaire des ions H^+. Le pH peut varier de 0 à 14 ; le milieu de l'échelle (pH = 7) correspond à une teneur en ions H^+ égale à celle de l'eau pure. Les solutions ayant un pH inférieur à 7 contiennent plus d'ions H^+ que l'eau (sont « acides » dans la conception traditionnelle), les solutions de pH supérieur à 7 sont moins acides que l'eau.

La réaction acido-basique est un cas particulier d'oxydo-réduction

Malgré leur caractère généralisé, les théories de Brönsted ne sont pas l'aboutissement des travaux sur les acides et sur les bases. Des auteurs comme Lewis ou Usànovich ont tenté une généralisation plus vaste encore, acceptant comme des réactions du type acide-base des échanges ne faisant plus intervenir des protons H^+, mais simplement des charges électriques. Les réactions d'oxydo-réduction deviennent alors un cas particulier des phénomènes acido-basiques. Ici, l'appareil théorique, fort satisfaisant, cesse parfois d'être directement utile à la pratique, d'où l'introduction de certains compromis.

Il faut remarquer que certains composés se comportent, suivant les circonstances, comme des acides ou comme des bases, captant ou cédant des protons tour à tour. Ce sont des corps amphotères. Certains couples acide-base donnent en solution des systèmes dont le pH reste relativement stable face à des tentatives de modification (par exemple, si l'on ajoute des ions H^+ dans un tel milieu, l'équilibre est déplacé dans le sens de la consommation de cet excédent). On dit que le milieu est tamponné. Les systèmes-tampons ont une grande importance, en particulier dans les phénomènes biochimiques. Ainsi, les cellules vivantes développent des systèmes-tampons qui stabilisent le milieu où s'opèrent les échanges complexes qui sont les leurs.

LA CHIMIE ANALYTIQUE

Une des tâches les plus importantes du chimiste, quel que soit le domaine particulier de ses préoccupations, est l'analyse des substances sur lesquelles il travaille, comme des phénomènes qui interviennent au sein de ces substances. L'analyse chimique se penche sur la première de ces préoccupations.

Dans la conception classique, un milieu complexe était d'abord fractionné en suivant une méthode très cartésienne, puis ses constituants étaient détectés et dosés quantitativement par des méthodes chimiques comme la volumétrie ♦ et la gravimétrie ♦. Mais les méthodes de travail de l'analyste ont été profondément transformées au cours des dernières années par des procédés plus fins, le plus souvent empruntés à la physique. D'une part, on peut travailler sur des échantillons plus petits (microanalyse) ; d'autre part, on

♦ Volumétrie : dosage se ramenant à des mesures de volumes.

♦ Gravimétrie : dosage se ramenant à des mesures de masses.

obtient des résultats plus précis, plus rapides. Souvent, la plupart des constituants sont dosés simultanément au lieu de recourir à des opérations successives fastidieuses. La sensibilité des méthodes nouvelles permet de doser des traces infimes d'un élément dans un mélange complexe. Par exemple, l'analyse par activation (qui consiste à irradier le corps étudié puis à analyser le rayonnement qu'il émet à son tour) permet de doser 10^{-16} % d'un élément dans un échantillon. La spectroscopie, à l'origine utilisée pour l'analyse qualitative, permet des dosages rapides et quantitatifs d'échantillons complexes (roches, alliages, etc.) pour l'ensemble de leurs constituants intéressants. Ces méthodes et d'autres encore (polarographie, potentiométrie, fluométrie, spectrographie de masse, analyse catalytique, etc.) ont transformé les laboratoires d'analyse. Mais la gravimétrie et la volumétrie ont également fait des progrès et, actuellement, on dose couramment des échantillons de poids inférieur au milligramme. L'analyse « chimique » est devenue un monde vaste, complexe et dont les diverses branches exigent une spécialisation fort poussée.

LA CHIMIE ORGANIQUE

Depuis longtemps, la chimie organique a dépassé son objet initial d'études, qui était celui des composés issus du monde vivant. Dans une certaine mesure, la biochimie a pris ce relais, alors que la chimie organique est devenue, plus généralement, celle des composés du carbone « tétraédrique » (on exclut toutefois de son domaine les quelques composés qui ne contiennent pas en même temps d'atomes d'hydrogène ; ces derniers continuent d'appartenir au monde minéral). Il s'agit là d'une branche très fertile, portant sur des centaines de milliers de composés, ce qui est bien supérieur au nombre de composés appartenant à la chimie minérale, bien que cette dernière présente moins de monotonie quant aux éléments entrant dans la constitution de ses composés.

Un effort important d'analyse a permis de déterminer la composition quantitative puis la structure spatiale des molécules souvent complexes des composés organiques et, enfin, a abouti à la caractérisation des grandes fonctions particulières à ces composés (par exemple, la fonction aldéhyde, cétone, acide, alcool, etc.). Mais, surtout, la chimie organique a été caractérisée par les synthèses qui ont permis de reconstituer la plupart des composés naturels, même les plus complexes, comme les grandes protéines du monde vivant. Mais la grande majorité des corps organiques connus sont d'origine artificielle et n'existent pas dans la nature. Durant longtemps, chaque chimiste mettait un point d'honneur à créer un composé inédit, grâce aux méthodes générales de synthèse qui ont été mises au point durant le siècle écoulé. De façon moins académique, l'industrie a puisé dans ce vaste arsenal pour préparer à grande échelle des composés

« sur mesure » pour chaque usage précis. La première synthèse organique, celle de l'urée ♦ par Wœhler ♦, en 1828, est aujourd'hui remplacée par des méthodes modernes, et le monde industriel produit l'urée à l'échelle de millions de tonnes par an. Les matières plastiques, les colorants, les textiles synthétiques, les élastomères ♦ dominent une civilisation qui hier encore était celle de la métallurgie. La synthèse fine a abouti à la création de centaines de corps biologiquement actifs et, en particulier, la pharmacopée est remplie de médicaments obtenus par synthèse.

♦ Le cas de l'urée, composé chimique relativement simple, de formule $(NH_2)_2CO$, est un exemple intéressant du développement pratique de la chimie. Ce corps, produit de métabolisme, n'était connu traditionnellement que dans les sécrétions animales et appartenait ainsi indiscutablement à la chimie « organique » au sens ancien du terme. Sa synthèse par Wœhler a eu un retentissement considérable, prouvant qu'il était possible de fabriquer artificiellement et *in vitro* des composés dont on croyait auparavant la synthèse impossible sans intervention d'une « force vitale » résidant dans les organismes vivants. La synthèse de Wœhler était une opération relativement complexe ; elle utilisait l'action du sulfate d'ammonium sur l'isocyanate de potassium. Or, de nos jours, l'urée est devenue une matière industrielle de première importance ; on construit des usines qui la produisent par synthèse au rythme de 1 500 tonnes par jour chacune. La synthèse utilisée est bien plus simple que la réaction de Wœhler : on fait agir sous pression de l'ammoniac (également synthétique) sur du gaz carbonique : $2\,NH_3 + CO_2 \rightleftharpoons CO(NH_2)_2 + H_2O$. L'importance de l'urée sur le plan industriel vient de son emploi en tant qu'engrais. C'est également une source importante d'azote pour l'alimentation animale. Elle est enfin utilisée pour d'autres synthèses industrielles (colles urée-formol, mélamine, polyuréthanes, verres organiques, etc.).

♦ Frédéric Wœhler chimiste allemand du XIXe siècle. Il découvrit également l'aluminium et étudia le bore.

♦ Elastomère : caoutchouc synthétique.

Analyse immédiate et analyse élémentaire

Les premières difficultés de la chimie organique venaient de la grande complexité du monde vivant qui servait de source à ses préoccupations. Souvent, on doit traiter un mélange de composés parfois très voisins et il faut d'abord les isoler à l'état pur. C'est le problème de l'analyse immédiate, utilisant diverses méthodes chimiques et physiques — comme la chromatographie — souvent poussées à un degré de finesse supérieur à ce dont la chimie minérale a besoin. Par de telles méthodes, on parvient à isoler des composés purs et on constate, par exemple, que la canne à sucre ou la betterave contiennent exactement le même composé : le saccharose.
Une fois le composé pur isolé, on procède à l'analyse qualitative et quantitative des éléments qui composent sa molécule. On trouve toujours du carbone et de l'hydrogène, souvent combinés au moins à un autre élément : azote, oxygène, soufre, phosphore, quelques métaux, chlore, arsenic, silicium... La liste est brève : on retrouve à peine dans les composés organiques le dixième du tableau de Mendéléïev.

Formules développées

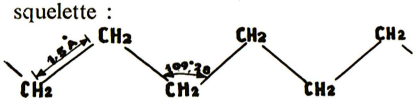
Enfin, on détermine la structure spatiale exacte de la molécule. Cette connaissance a ici une importance fondamentale. Il existe en effet souvent plusieurs composés ayant la même formule brute et dotés pourtant de propriétés très différentes ; ces différences tiennent à la façon dont les atomes sont assemblés dans l'édifice. On détermine la masse moléculaire du composé (cela est important, car les composés d'une même série, qui ne diffèrent entre eux que par le nombre de groupes — CH_2 — enchaînés les uns aux autres, ont des proportions voisines de différents éléments), les méthodes physiques permettent ensuite d'en analyser la structure. On confirme généralement l'image obtenue d'une molécule en tentant de la reconstruire par synthèse, ce qui est un moyen général de contrôle, particulièrement précieux dans le cas de composés complexes, dotés de plusieurs fonctions différentes en des sites précis de la molécule.

Différents modes de représentation d'un fragment de longue chaîne d'hydrocarbures

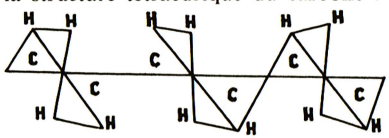
1. formule brute : $(CH_2)n$

2. formule développée :
— CH_2 — CH_2 — CH_2 — CH_2 —

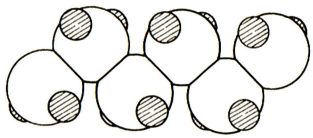
3. schématisation de la structure du squelette :



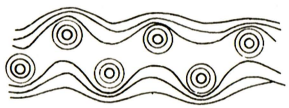
4. schématisation avec indication de la structure tétraédrique du carbone :



5. représentation de l'encombrement des atomes de la molécule :



6. représentation plane des lignes d'égale densité électronique :



Fonctions organiques

Les composés organiques sont groupés en familles, caractérisées par la présence d'un groupement d'atomes particulier qui confère à la molécule des propriétés spécifiques. Certaines de ces fonctions sont analogues à celles de la chimie minérale : les acides organiques ont un groupe carboxylé — COOH dont le comportement les rapproche des acides minéraux faibles. Mais un grand nombre de fonctions sont particulières à la chimie organique. Souvent, les molécules peuvent posséder en même temps plusieurs fonctions qui peuvent, si elles sont voisines les unes des autres, interagir et donner à l'ensemble des propriétés particulières.

Les cycles carbonés les plus répandus sont des cycles hexagonaux

Les corps organiques appartiennent souvent à la classe des aliphatiques, dans laquelle les atomes de carbone qui forment le squelette linéaire de la molécule sont liés les uns aux autres en formant une longue chaîne. Celle-ci peut être simple — on dit alors que le carbure est « normal » — ou bien porter des ramifications. Quand cette chaîne, au lieu de rester ouverte, se referme sur elle-même en formant des cycles, le composé appartient à la classe des carbures cycliques. Les composés aliphatiques peuvent être saturés (c'est-à-dire ne pas comporter de doubles ou triples liaisons entre deux carbones voisins) ou non saturés. Dans le premier cas, on les appelle composés paraffiniques. Si la molécule comporte des doubles liaisons, le composé est appelé oléfinique ♦ ; si une triple liaison apparaît, il s'agit d'un acétylénique.

♦ Ou éthylénique.

Les composés cycliques peuvent également être saturés — ce sont alors des cyclanes — ou non saturés, qui s'appellent cyclènes. L'orien-

Quelques exemples de carbures

1. hexane « normal » :
$CH_3 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_3$

2. un des isohexanes (méthyl-3 pentane) :

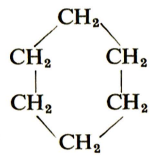
$$\begin{array}{c} \quad\quad CH_3 \\ CH_3 - CH_2 - CH - CH_2 - CH_3 \end{array}$$

3. un des hexènes (carbure éthylénique) :
$CH_3 - CH = CH - CH_2 - CH_2 - CH_3$

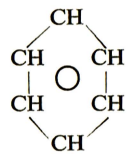
4. hexadiène butadiénique (doubles liaisons conjuguées) :
$CH_3 - CH = CH - CH = CH - CH_3$

5. un hexyne (carbure acétylénique « vrai ») ;
$CH \equiv C - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_3$

6. cyclohexane :



7. benzène (cyclohexatiène : premier carbure « aromatique ») :



tation spatiale des quatre liaisons de covalence du carbone fait que le cycle enchaînant six atomes de carbone est le plus répandu (encore que le cycle à cinq carbones soit fréquent et qu'il ait été possible de refermer sur elle-même une chaîne à trois atomes de carbone). Parmi les cycles hexagonaux, une place particulièrement importante revient aux carbures ayant trois doubles liaisons dans le cycle. On appelle ces composés des aromatiques ; le benzène est leur tête de série ♦. Enfin, souvent les composés cycliques possèdent plus d'un cycle dans leur molécule ; parfois, ces cycles sont accolés ou condensés. Outre ces grandes distinctions, fondées sur la forme générale de la molécule, il est utile de passer en revue les principales fonctions organiques.

♦ Il existe des composés cycliques dans lesquels le squelette du cycle comporte des atomes autres que ceux de carbone : azote, soufre, oxygène peuvent entrer ainsi dans le cycle. On appelle ces composés des hétérocycles.

Les carbures

Les carbures sont les composés de base ; dans la plupart des cas, les autres composés en dérivent par la substitution de groupements fonctionnels spécifiques à certains atomes d'hydrogène. Les carbures, ou hydrocarbures, ne sont composés que de carbone et d'hydrogène. Les atomes de carbone s'enchaînent les uns aux autres ; leurs liaisons disponibles sont saturées par des atomes d'hydrogène. Il n'y a pas d'autres éléments dans leur molécule. Si tous les atomes de carbone sont reliés par des liaisons simples de covalence, le carbure présente une certaine inertie aux réactions chimiques, ce qui a valu à la famille le nom de paraffines ♦. En revanche, si le carbure comporte une ou plusieurs doubles liaisons, il est plus réactif, cette double liaison pouvant s'ouvrir pour accueillir de nouveaux atomes (réactions d'addition). Un cas intéressant est celui de carbures à deux doubles liaisons (diènes), quand celles-ci sont séparées par une liaison simple.

♦ Paraffine : du latin *parum affinitatis*, peu d'affinité.

On dit alors que les doubles liaisons sont conjuguées. Souvent, les molécules complexes possèdent plusieurs doubles liaisons conjuguées, ce qui leur confère une stabilité et une configuration électronique particulières, ainsi qu'une coloration souvent intense. Parmi les cas intéressants, on peut citer celui du noyau benzénique qui a trois liaisons conjuguées ♦.

♦ Dans ce cas, il y a résonance entre plusieurs configurations possibles par la structure de cette molécule qui en tire une stabilité très grande.

Fonctions oxygénées

L'introduction d'un atome d'oxygène dans un squelette de carbure se fait le plus souvent au sein d'un groupement d'atomes particulier. On distingue ainsi :

— La fonction alcool, caractérisée par le groupe — OH attaché à un carbone du squelette (par exemple, l'alcool méthylique $CH_3 — OH$).

— La fonction aldéhyde, caractérisée par le groupe — CHO (l'aldéhyde acétique ou éthanol $CH_3 — \underset{\underset{O}{\|}}{CH}$).

— Les cétones, dont les propriétés viennent d'un groupe — CO — (le méthyl-éthyl cétone $CH_3 — \underset{\underset{O}{\|}}{C} — CH_2 — CH_3$ [ou $CH_3 — CO — C_2H_5$]).

— Les éthers, porteurs d'un groupe — O — entre deux radicaux carbonés.

— Les <u>acides</u>, caractérisés par le groupement — COOH (l'acide benzoïque $C_6H_5 — COOH$).

— Les <u>esters</u>, produits de condensation entre un acide et un alcool, ce qui leur donne un groupement — COO —.

Bien entendu, une même molécule peut porter en même temps plusieurs de ces groupements, soit identiques (c'est le cas des polyols ♦, qui portent plus d'une fonction alcool, telle la glycérine), soit différents : les acides-alcools (comme l'acide lactique) ont un groupement acide et un groupe alcool, etc. Les glucides portent plusieurs fonctions alcool et, de plus, une fonction aldéhyde ou cétone : le glucose, par exemple, combine cinq fonctions alcool avec une fonction aldéhyde :

♦ Polyol ou polyalcool.

$$CH_2OH — \underset{\underset{OH}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{C}} — \underset{\underset{OH}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{C}} — \underset{\underset{H}{|}}{\overset{\overset{OH}{|}}{C}} — \underset{\underset{OH}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{C}} — CHO.$$

Cette molécule peut présenter quinze autres formes isomères, dues à la présence de quatre carbones asymétriques.

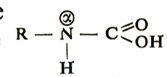
Fonctions azotées

L'azote a une importance particulière dans les corps biologiquement actifs. Il est présent dans les composés sous la forme de la fonction nitrile — C ≡ N, de la fonction carbylamine — N ≡ C (qui est isomère de la fonction nitrile), comme fonction amine (il y a trois sortes d'amines ; primaires, secondaires et tertiaires), comme fonction amide (également primaires, secondaires et tertiaires), enfin sous la forme de dérivés nitrés portant le groupe — NO_2.

Beaucoup de molécules intéressantes du point de vue biochimique comportent de l'azote, souvent sous forme d'amines associées à d'autres fonctions. C'est le cas des acides aminés, qui portent une fonction amine en position alpha ♦ d'un groupement acide carboxylé. Ce sont les briques de base à l'aide desquelles sont construites les molécules les plus complexes de protéines. Bien que le nombre théorique d'acides aminés possibles soit très grand, une vingtaine seulement d'amino-acides sont importants dans le monde vivant parce qu'ils forment toutes les molécules protidiques, même les plus complexes. Souvent, en plus de la fonction amine et de la fonction acide voisines, qui leur confèrent leurs propriétés spéciales, les amino-acides portent plus loin dans leur molécule d'autres groupes fonctionnels.

La synthèse de ces composés de base du monde vivant ne pose pas de problèmes particuliers et certains, comme la lysine, font l'objet de fabrications industrielles à grande échelle, ce qui permet théoriquement d'agir pour compenser par synthèse les déficits protidiques dans l'alimentation animale (les animaux sont incapables de synthétiser onze des acides aminés dont leur organisme a besoin).

♦ Position α, c'est-à-dire immédiatement à côté de la fonction considérée :



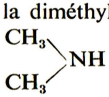
(R = radical).

Quelques exemples de fonctions azotées :

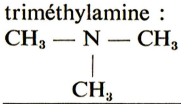
1. Un exemple de la fonction nitrile : acétonitrile (ou éthane-nitrile)
$CH_3 — C \equiv N$.

2. L'amine primaire la plus simple, la monométhylamine :
$CH_3 — NH_2$.

3. L'amine secondaire la plus simple, la diméthylamine :



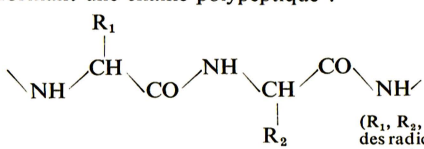
4. L'amine tertiaire analogue, la triméthylamine :



5. Un exemple de diamine primaire, la cadavérine :
$NH_2 — (CH_2)_5 — NH_2$.

6. L'acide aminé le plus simple, le glycocolle :
$NH_2 — CH_2 — COOH$.

7. L'enchaînement d'acides aminés formant une chaîne polypeptique :



(R_1, R_2, etc., symbolisent des radicaux organiques parmi les 20 possibles).

Le secteur de pointe de la chimie organique : la biochimie

L'examen du monde vivant et des phénomènes vitaux à l'aide de l'outil chimique est une des plus grandes préoccupations de la science contemporaine. Nombre de prix Nobel de chimie, ces dernières années, ont été attribués à la suite d'études biochimiques. La biologie moléculaire s'attache à l'explication des phénomènes très fins au sein des cellules vivantes par la connaissance des structures moléculaires et de leurs transformations. Ce qui est aujourd'hui frappant, c'est le déplacement du centre de gravité de ces études des laboratoires traditionnellement adonnés à la chimie vers les spécialistes des méthodes physiques : ce sont les physiciens spécialistes de la résonance magnétique nucléaire et du bombardement électronique qui déterminent en série les structures des composés naturels les plus complexes. Ainsi, la physique a conquis le domaine de la chimie apparemment le plus éloigné d'elle. Cette interpénétration est significative. Les phénomènes de transmission de signaux nerveux, de synthèse protidique dans les cellules, de vision ou de génétique livrent progressivement leurs secrets aux physico-chimistes.

La chimie est aujourd'hui spectaculaire par deux aspects différents de ses activités. D'une part, sur le plan industriel, elle réussit des synthèses qui permettent la production de masses de produits conçus pour un usage précis. Cet aspect n'est pas au bout de ses développements ; ainsi, la production et la consommation par tête d'habitant des matières plastiques doivent tripler d'ici à 1980 dans la plupart des pays développés. Les grandes sociétés industrielles mettent sans cesse au point les produits destinés à remplacer, en cas de besoin, ceux que nous utilisons aujourd'hui, notamment pour des raisons de lutte contre la pollution. L'autre aspect spectaculaire du développement chimique, aujourd'hui, c'est l'affinement continuel des méthodes d'investigation qui permettent une meilleure connaissance théorique des phénomènes. Certes, il reste ici de grands progrès à faire : la plupart des phénomènes échappent encore à la prévision et la chimie reste pour une large part (et pour sa partie la plus fertile) une science expérimentale. Souvent, on ajuste le calcul théorique explicatif à la réalité par une série d'hypothèses successives. Mais, comme il a été dit dans l'introduction, quelque chose est en train de changer : dans les décennies à venir, comme dans celles que nous venons de vivre, l'accroissement quantitatif et qualitatif des connaissances chimiques suit une courbe exponentielle ♦ qui doit finir par changer la nature même des préoccupations du chimiste.

♦ Voir Aperçu mathématique page 21.

Jacques Burko.

CHIMIE MINÉRALE - CHIMIE ORGANIQUE (Inorganic chemistry) (Organic chemistry)

pages 92, 116, 127 à 133, 177, 268, 531.

La chimie minérale est la plus ancienne branche de la chimie. C'est la chimie de la matière inerte, par opposition à la matière vivante.
Elle a donc pour but l'étude des éléments et de leurs combinaisons.
La distinction entre chimie minérale et chimie organique ne s'impose actuellement que pour des raisons techniques.
En effet, si, à l'origine, la matière organique semblait avoir des lois différentes de la matière minérale, et en particulier celle de ne pouvoir être créée que dans un organisme vivant (d'où son nom) par l'intervention d'un « fluide vital », les synthèses de l'urée par Woehler (1828) et de nombreuses substances organiques par Marcelin Berthelot ont aboli cette distinction. Il n'en reste pas moins vrai que la chimie organique a, pour des raisons techniques, une existence propre : les composés organiques sont facilement décomposables sous l'action de la chaleur. De plus, les réactions entre corps organiques sont en général lentes, limitées et n'intéressent qu'une partie de la molécule. Pour cette raison, les laboratoires de chimie organique nécessitent des appareillages différents de ceux qu'utilise la chimie minérale.

Enfin, malgré l'intervention de substances rares dans des substances vivantes, la chimie organique reste essentiellement la chimie du carbone : à partir des quatre éléments essentiels (carbone, oxygène, hydrogène, azote) et d'autres plus rares (silicium, soufre, chlore, iode, brome), le nombre des composés organiques connus et souvent réalisés par synthèse dépasse le million.
La réussite de la chimie organique est d'avoir ainsi produit non seulement des substances existant dans la matière vivante (vitamines, hormones, etc.), mais encore des substances nouvelles qui facilitent notre vie courante : plastiques, tissus, médicaments...

CINÉTIQUE CHIMIQUE (Chemical kinetics)

pages 119 à 122.

C'est la branche de la chimie qui étudie les mécanismes et la vitesse d'une réaction chimique.
Une réaction représente l'aboutissement d'une suite de mécanismes élémentaires (dissociation de molécules, ionisation, formation de composés intermédiaires instables, etc.), aboutissement qui peut demander un temps appréciable : si la neutralisation d'un acide par une base se produit instantanément, le vin vieillit par une suite de réactions demandant plusieurs années!
La vitesse de réaction peut donc se définir.
S'il apparaît entre deux instants t_1 et t_2 une quantité Q d'un des produits de la réaction, la vitesse est proportionnelle au quotient : $\frac{Q}{t_2 - t_1}$.
La connaissance des vitesses de réaction, mesurées expérimentalement, permet d'accéder à celle des mécanismes de réaction, ce qui permet ensuite d'influer sur ces vitesses.

La cinétique chimique a donc autant d'importance théorique que pratique, puisqu'elle permettra d'influer sur le rendement d'une réaction industrielle ou, au contraire, d'empêcher (stabilisation) une réaction de se produire (on retrouve ici la notion de catalyseur, essentielle en cinétique chimique).

CINÉTIQUE (Théorie des gaz) (Kinetic theory of gases)

pages 83, 114, 137, 140, 320, 514.

Théorie permettant d'interpréter les propriétés des gaz à partir d'un certain nombre d'hypothèses :

— les directions des vitesses des molécules (à un instant donné) sont distribuées au hasard ; toutes sont donc également probables. C'est le chaos moléculaire, ou chaos de Maxwell ;

— la vitesse moyenne des molécules est d'autant plus élevée que la température est plus élevée ;

— les molécules n'ont d'interactions qu'au moment des chocs, ce qui peut servir d'ailleurs à caractériser l'état gazeux ;

— les mouvements des molécules satisfont aux lois de la mécanique ;

— l'énergie des molécules est essentiellement une énergie cinétique.

A partir de ces hypothèses, Clausius a interprété les lois des gaz parfaits ♦ et montré, par exemple, qu'on pouvait expliquer la loi de Mariotte par la formule :

$p\,V = \frac{1}{3}\,m\,V^2$ où p, V = pression et volume du gaz, m = masse d'une molécule,

V^2 = moyenne du carré des vitesses des molécules (vitesse quadratique moyenne).

L'introduction de la mécanique quantique a permis d'interpréter de façon satisfaisante les valeurs des chaleurs massiques des gaz et leurs variations avec la température.

♦ Gaz parfaits: ce sont les gaz qui satisfont aux lois simples de Mariotte, Gay-Lussac et Joule.

CIRCUITS INTÉGRÉS ♦ (Integrated circuit)

pages 90, 159, 187, 242, 308, 497.

Circuits obtenus en réalisant, sur un même bloc de germanium ou de silicium, des dépôts d'indium, par exemple, constituant tout un ensemble de transistors connectés d'autant plus simplement que leur base est commune (le bloc de germanium), et remplissant une fonction précise (amplification, circuit logique, etc.). Le principal intérêt de ces circuits est la miniaturisation qu'ils autorisent.

♦ Pour plus de précisions, lire l'article : l'Électronique, pages 240 à 245.

CLASSIFICATION PÉRIODIQUE (Periodic classification)

pages 40 à 45, 250, 273, 305, 327, 339, 340, 355, 502, 522.

Le fait que des corps simples tels que le sodium, le potassium, le lithium ou que le chlore, le brome, l'iode, aient des propriétés chimiques très voisines n'avait pas échappé aux chimistes. De Chancourtois ♦ avait proposé, sans grand succès (1862), de ranger les éléments le long d'une hélice circulaire par masse atomique croissante, de manière que les corps homologues ♦ soient sur une même génératrice.

En 1869, Lothar Meyer ♦ et Mendéléïev proposent un tableau ♦ dans lequel les éléments sont rangés en lignes par ordre de masses atomiques croissantes, les corps ayant mêmes propriétés chimiques se trouvant dans une même colonne.

Pour arriver à ce résultat, Mendéléïev était amené :

— à laisser des cases vides (pour les éléments non découverts) ;

— à intervertir certains éléments, donc à faire une entorse à la règle des masses atomiques croissantes.

L'expérience confirma l'intuition de Mendéléïev : petit à petit, toutes les cases de la classification se trouvèrent comblées par des éléments nouveaux.

Certains, comme le germanium, correspondaient parfaitement à la description qu'en avait donnée par avance Mendéléïev.

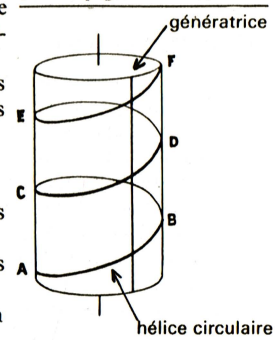
Les progrès dans l'étude de la structure de la matière ont justifié cette classification, appelée maintenant périodique ♦.

♦ Alexandre E. Beguyer de Chancourtois, chimiste français (1820-1886), qui proposa en 1862 une classification des éléments.

♦ Corps homologues : corps ayant des propriétés comparables.

♦ Lothar Meyer, chimiste suisse, né en 1830, mort en 1895.

♦ Voir pages 42 et 43.



♦ On appelle période la série d'éléments situés sur une même ligne.

L'ordre est celui non pas des masses, mais des numéros atomiques, ce qui explique les inversions opérées par Mendéléïev, qui eut la chance que les masses et numéros atomiques varient dans le même sens et soient sensiblement doubles l'un de l'autre! Le numéro atomique étant égal au nombre d'électrons entourant le noyau, au fur et à mesure du remplissage des couches électroniques successives on retrouvera des éléments ayant même nombre d'électrons sur la couche externe, entraînant des propriétés chimiques comparables, ce qui explique la périodicité et justifie une classification d'origine empirique.

CLAUDE (Georges) page 329.

Physicien français, né à Paris en 1870, mort en 1960.
Ancien élève de l'École de physique et chimie, Claude se distingue tout au long de sa vie par ses découvertes et ses remarquables travaux en matière de physique industrielle et d'applications techniques. Ingénieur et technicien de haute qualité, il consacre néanmoins une partie de son temps à la recherche théorique. Élu membre de l'Académie des sciences en 1924, il en est exclu à la fin de la Seconde Guerre mondiale pour des motifs politiques.

Grâce aux recherches qu'il effectue dans le domaine de la liquéfaction des gaz, Claude étudie les propriétés des corps condensés à de très basses températures. Sa découverte de la multiplication du pouvoir absorbant du charbon poreux aux basses températures lui permet d'obtenir des vides poussés.
D'autre part, il met au point un certain nombre de procédés industriels : la dissolution de l'acétylène dans l'acétone, ce qui en rend possible le transport ; la liquéfaction de l'air par détente avec travail extérieur ; la préparation de l'oxygène et de l'azote à l'aide de l'air liquide ; l'éclairage par les tubes au néon ; la synthèse de l'ammoniaque... Enfin, il se penche longuement sur la recherche de nouvelles sources d'énergie, en particulier celles de la mer.

Ouvrages essentiels :
L'Air liquide, sa production, ses propriétés, ses applications (Dunod, Paris, 1903).
La Synthèse de l'ammoniaque (Imp. Chaix, Paris, 1922).
Air liquide, oxygène, azote (Dunod, Paris, 1926).
Pour l'utilisation de l'énergie thermique de la mer (Inst. océanographique, Monaco, 1930).

CLAUSIUS (Rudolf) pages 135, 265, 317.

Physicien allemand, né à Köslin (Poméranie) en 1822, mort à Bonn en 1888. Professeur de physique dans diverses universités allemandes et membre de nombreuses sociétés scientifiques, Clausius excelle dans le domaine de la physique théorique. En 1850, il énonce que « la chaleur ne peut passer d'un corps froid à un autre plus chaud spontanément ». Ce célèbre postulat constitue, avec le postulat équivalent de Thomson, le pivot du second principe de la thermodynamique. Reprenant alors le principe de Carnot sur les cycles de la chaleur, il en dégage la notion d'entropie. Les progrès de la machine à vapeur sont directement issus de ces travaux.
Les autres recherches de Clausius lui permettent de résoudre des problèmes qui mèneront à des développements féconds. Il pose les bases de la théorie cinétique des gaz, de la théorie de la dissociation électrolytique (qui sera établie ensuite

par Arrhenius) et de la théorie mathématique de l'élasticité. Enfin, il mesure l'équivalent mécanique de la calorie en utilisant le dégagement de chaleur produit par les courants électriques♦.

♦ *Théorie mécanique de la chaleur* (Lacroix, Paris, 1868-1869). *Introduction à la physique mathématique ; De la fonction potentielle et du potentiel* (Gauthier-Villars, Paris, 1870).

CŒUR (d'un réacteur nucléaire) pages 454, 492.

Partie d'un réacteur qui contient le combustible nucléaire et où s'effectuent les réactions. Il contient donc à la fois le combustible lui-même et le modérateur ♦.

♦ Voir Réacteurs.

COHÉRENCE ♦ (Coherence) pages 262, 304, 322, 323, 371 à 380, 449.

♦ Pour plus de précisions lire l'article : l'Optique, pages 371 à 375.

On estime que, lorsqu'un atome émet de la lumière, la durée de cette émission — ou train d'ondes lumineuses — est de l'ordre du millionième de seconde. Il y a donc très peu de chances pour qu'un atome voisin émette une radiation en synchronisme parfait. En général, les radiations émises par une source lumineuse (filament incandescent, arc électrique, etc.) forment un ensemble de trains d'ondes absolument indépendants entre eux. On dit qu'il y a incohérence.
Cela nous permet de définir, par opposition, la cohérence. Nous aurons une source de lumière cohérente si tous les atomes émettent en synchronisme. En termes électroniques, cela signifie que tous les électrons susceptibles de passer d'un niveau 1 à un niveau 2 le font en même temps, sur un signal donné. C'est la base de l'effet laser, qui fournit de la lumière cohérente.

COMBURANT (Comburent)

Substance favorisant une combustion. L'oxygène de l'air est le comburant permettant les combustions classiques, qui sont des oxydations.
Ce n'est pas le seul. L'acide nitrique des moteurs de fusées est le comburant, le combustible étant alors souvent un produit pétrolier.

COMBUSTIBLE (Fuel) pages 97, 137, 172, 263, 273, 324, 454, 481, 492, 495, 519.

Dans le langage courant, le combustible est le produit qu'on brûle dans un foyer ou dans un moteur thermique et dont la combustion produit de la chaleur.

COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE (Nuclear fuel)

Par extension, on appelle combustible la matière fissile employée dans un réacteur nucléaire et qui est consommée au cours du fonctionnement du réacteur.
On utilise généralement :
— l'uranium (U) soit sous forme d'uranium naturel, mélange de U-238, non fissile, et de U-235 (0,7 %) fissile, soit sous forme d'uranium enrichi en U-235 ou même l'U-235 pur.
— le plutonium (Pu) 239, provenant lui-même des transformations de U-238.
— l'uranium 233, issu du thorium ♦.

♦ Voir l'article : l'Atome, page 61.

COMBUSTION (Combustion) pages, 92, 137, 256, 306, 348, 411, 515, 526.

Réaction au cours de laquelle se produit un dégagement de chaleur et qu'on utilise justement dans ce but. Les combustions courantes sont des oxydations : l'oxydant est l'oxygène de l'air, le corps oxydé étant le combustible. Ce n'est

pas toujours le cas : la « combustion » de l'hydrogène peut se produire dans le chlore. Cette réaction est utilisée pour préparer l'acide chlorhydrique.
En technique nucléaire, la combustion est la réaction de fission ♦ subie par le combustible. Elle a en commun avec la combustion classique la production de chaleur.

♦ Voir l'article : l'Atome, pages 67 à 71.

COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE : voir C.E.A.

COMPRESSIBILITÉ (Compressibility) pages 25, 85, 332, 335, 356.

Propriété d'un corps caractérisant son comportement lorsqu'on lui applique une compression. On définit un coefficient de compressibilité de la façon suivante : un corps de volume v_0 sous la pression p_0 a un volume v sous la pression p ; le coefficient de compressibilité est $K = -\frac{1}{v_0} \times \frac{v - v_0}{p - p_0}$

ou, pour des variations très petites dp et dv ♦ : $K = -\frac{1}{v} \times \frac{dv}{dp}$.

♦ On a l'habitude de noter de petites variations de p par dp et de les considérer ensuite comme des infiniment petits mathématiques, ce qui explique l'introduction de la dérivée $\frac{dp}{dv}$ (voir Aperçu mathématique).

Compressibilité des gaz

Les gaz sont les corps les plus compressibles. La compressibilité à température constante (isotherme), étudiée par Boyle et par Mariotte, conduit à la loi :
$p\,V$ = constante, où p = pression, et V = volume.
La compression sans échange de chaleur (adiabatique) conduit à la loi de Laplace :
$p\,V^{\gamma}$ = constante, où γ est un coefficient caractéristique du gaz.
Qu'il s'agisse de compression adiabatique ou isotherme, les gaz ont sensiblement même coefficient de compressibilité.

Compressibilité (terme d'aérodynamique)

L'air s'écoulant autour d'un corps en déplacement par rapport à lui peut être considéré comme un fluide sensiblement incompressible tant que la vitesse n'est pas trop grande (environ la moitié de la vitesse du son). Au-delà, l'écoulement suit des lois où l'on doit considérer l'air comme subissant des compressions ou détentes adiabatiques. C'est dans ce domaine qu'apparaissent, sur une aile, des phénomènes d'ondes de choc altérant ses propriétés : sa portance diminue et la résistance à l'avancement (traînée) augmente.

COMPRESSION (Compression) pages 173, 215, 254, 264, 316, 328, 340, 349.

Opération au cours de laquelle on exerce sur un corps des contraintes tendant à diminuer son volume.

COMPTEURS (Counters) pages 99, 267, 381, 424, 428, 441.

Dispositifs ayant pour but de déceler un rayonnement (électromagnétique ou particulaire) à partir de phénomènes produits par ces rayonnements, pouvant se traduire par des impulsions électriques.

Compteur Cerenkov

Dans ce type d'appareil, la lumière émise par effet Cerenkov au passage d'une particule est reçue sur un photomultiplicateur qui fournit alors une impulsion électrique.

Compteur Geiger
Dans un tube de constitution analogue à une chambre d'ionisation, une particule provoque une ionisation. Si la tension entre anode et cathode est élevée, aux ions produits par une particule s'ajoutent ceux qui se produisent par des phénomènes secondaires dus au champ électrique intense. Un tel compteur est sensible, mais ne donne pas d'indications sur l'énergie de la particule incidente.

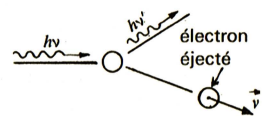
Compteur proportionnel
Dans le dispositif précédent, si la tension est moins élevée, le nombre d'ions produits est proportionnel à l'énergie de la particule incidente ♦. On peut donc mesurer l'énergie de cette particule par l'importance de l'impulsion électrique créée.

♦ Voir Chambre d'ionisation.

Compteur à scintillations
L'arrivée d'une particule sur un écran de sulfure de zinc ou d'iodure de sodium provoque une brève fluorescence. La lumière émise, reçue sur un photomultiplicateur, donne une impulsion électrique. Le dispositif est sensible et, de plus, n'a pas de « temps mort » comme un compteur Geiger. Il est largement utilisé.

COMPTON (EFFET) (Compton effect)

Effet au cours duquel un photon d'énergie $h\nu$ (h : constante de Planck ; ν : fréquence de la radiation) communique une partie de son énergie à un électron. Celui-ci prend alors une vitesse v, tandis que le photon, qui a une énergie $h\nu' < h\nu$, est diffusé dans une direction différente (en général) de la direction primitive.



CONDENSATEUR (Condenser) pages 189, 229, 264, 274, 308.

Appareil constitué de deux « armatures » en regard (en général, deux plaques métalliques) séparées par un espace isolant (vide ou isolant matériel : air, mica, papier, etc.).
Un tel dispositif ne permet pas le passage d'un courant continu. Mais, lorsque les armatures sont reliées à un générateur, elles prennent des charges égales et opposées. C'est la valeur commune des charges qu'on nomme charge Q du condensateur.
Cette charge Q dépend de la tension V appliquée aux armatures : elle lui est proportionnelle, c'est-à-dire que, pour un condensateur donné, les charges Q_1, Q_2, Q_3, correspondant à des tensions V_1, V_2, V_3, sont telles que :

$$\frac{Q_1}{V_1} = \frac{Q_2}{V_2} = \frac{Q_3}{V_3} = C \quad \text{ou} \quad Q = CV$$

C'est la capacité du condensateur qu'on mesure en farads (F) lorsque V est exprimé en volts et Q en coulombs ♦.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

Un condensateur est un exemple de deux conducteurs en influence totale et la relation entre charge et tension est une application particulière des lois des conducteurs en équilibre.
Lorsqu'on relie les deux armatures par un fil conducteur, le condensateur *n* décharge et restitue les charges accumulées : il peut ainsi jouer le rôle d'un générateur, pendant le temps généralement court que dure la décharge. L'énergie W ainsi fournie est celle qu'on avait dû fournir pour charger le condensateur. Elle vaut $W = \frac{1}{2} CV^2$ ♦.

♦ Un condensateur peut être utilisé comme réserve d'énergie (flashes magnésiques), mais les applications les plus importantes des condensateurs sont les circuits oscillants.

CONDUCTEUR (Conductor) pages 99, 140, 145, 186, 189, 192, 197, 205, 208, 210, 236, 257, 261, 267, 276, 313, 315, 316, 334, 340, 353, 357, 446, 453, 496, 498, 501, 504, 516, 517.

CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE ou CONDUCTIVITÉ (Conductivity) pages 30, 155, 156, 158, 176, 178, 190, 210, 235, 236, 275, 312, 355, 501, 505.

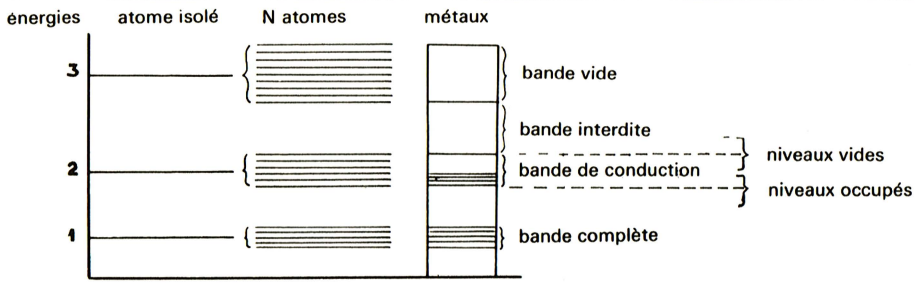
Grandeur physique mesurant l'aptitude d'un corps à conduire le courant électrique, c'est-à-dire la facilité avec laquelle s'effectue le mouvement des charges électriques. La conductibilité d'un milieu est liée à la structure de ce milieu et dépend en général de la température.

Mécanismes de la conduction

Ces mécanismes sont très différents selon le milieu étudié :

— Dans un métal, les électrons forment autour des ions positifs un « nuage » électronique assez comparable à un gaz ; le mouvement des électrons est chaotique et soumis aux lois du hasard : comme en théorie cinétique des gaz, toutes les directions que peut prendre l'électron sont également probables. Lorsqu'on applique un champ électrique, au mouvement désordonné se superpose un mouvement d'ensemble dans la direction du champ, et en sens contraire (les électrons étant négatifs). La physique quantique précise cette interprétation. Si les électrons d'un atome isolé ne peuvent occuper que des niveaux d'énergie discrets ♦, lorsqu'il s'agit d'un cristal comprenant un nombre N très grand d'atomes, on va retrouver non pas quelques niveaux, mais des bandes d'énergie comprenant chacune N niveaux très voisins (mais différents pour satisfaire à la quantification).

♦ C'est-à-dire discontinus.



Ces niveaux sont occupés ou non. En particulier, dans un métal, la dernière bande comporte des niveaux vides. C'est la bande de conduction. L'existence d'un champ électrique communique à un électron une énergie cinétique, le faisant passer sur un des niveaux vides de la bande de conduction, ce qui est très facile, du fait de la faible différence d'énergie entre deux niveaux voisins.

— Dans un isolant, tous les niveaux sont occupés, et la différence d'énergie entre les niveaux de la bande 2 et 3 est trop grande pour qu'un électron puisse faire ce saut. Aucun électron ne peut donc être mis en mouvement par le champ électrique.

Le cas limite entre ces deux types est celui des semi-conducteurs.

La conductibilité d'un métal est diminuée par une élévation de température : l'agitation thermique des ions positifs, en augmentant, augmente la fréquence des chocs avec les électrons et s'oppose au mouvement de ceux-ci.

— Dans un électrolyte, les charges sont portées par des ions positifs et négatifs, considérablement plus encombrants que les électrons. Leur mise en mouvement plus difficile par un champ électrique et le frottement des molécules de liquide

font que la conductibilité électrolytique est faible. Elle dépend de la concentration de la solution en ions et augmente avec la température.
Si le courant s'établit instantanément dans un circuit, cela correspond à la propagation de l'onde électrique à la vitesse de la lumière. Mais les charges, électrons ou ions, se déplacent à des vitesses beaucoup plus faibles (de l'ordre du micron par seconde).

CONDUCTIBILITÉ THERMIQUE (Thermal conductivity)

page 275.

La propagation de la chaleur dans un milieu suit des lois assez analogues à celles de la conductibilité électrique. En particulier, dans un métal, les électrons libres, dont l'agitation a été accrue en un point par une augmentation de la température, propagent cette agitation de proche en proche et augmentent progressivement la température du milieu.
Dans les isolants, ce sont les atomes eux-mêmes, dont l'agitation thermique croît, qui transmettent cette agitation de proche en proche. On a traduit ce phénomène en langage quantique en supposant une particule (ou plutôt une quasi-particule), le phonon, représentant un quantum d'énergie thermique, se propageant avec la célérité du son dans ce milieu.
En fait, dans un métal, les deux mécanismes sont présents, mais ce sont les électrons qui véhiculent la plus grande partie de l'énergie.

CONDUCTIVITÉ : voir Conductibilité électrique

CONSERVATION (lois de) (Principles of conservation)

pages 48, 62, 103, 113, 193, 252, 255, 257, 267, 272, 316, 324, 350, 354, 413, 427, 428, 430 à 434, 436, 515.

Lois exprimant qu'au cours des transformations que subit un système certaines grandeurs physiques restent constantes.
Deux lois de conservation ont été établies dès le début de l'« ère scientifique » (XVIIIe siècle) :
— *La loi de Lavoisier*, ou de *conservation de la masse*, suivant laquelle la masse d'un système isolé se conserve, quelles que soient les transformations qui s'y produisent.
— *La loi de conservation de l'énergie*, conséquence du premier principe de la thermodynamique : les différentes formes d'énergie se transforment de telle façon que l'énergie totale d'un système isolé reste constante.
Einstein ayant démontré l'équivalence de la masse et de l'énergie, ces deux lois ne font en réalité qu'une seule, qui exprime la conservation de l'énergie.

A côté de cette loi de conservation de l'énergie, la physique des particules ♦ en a établi d'autres :
— *Conservation de la charge électrique*. C'est ainsi que l'apparition d'une charge positive nécessite la production simultanée de la charge négative équivalente : un positron apparaît ou disparaît en même temps qu'un électron (leur masse se transforme en énergie ou inversement, conformément à la relation d'Einstein).
— *Conservation du nombre baryonique*, c'est-à-dire du nombre de particules de masse au moins égale à celle du proton. C'est ainsi que le choc de deux protons peut donner quatre particules : $p + p \longrightarrow \underbrace{p + p + p}_{\text{protons}} + \underset{\text{antiproton}}{\bar{p}}$,

♦ Se reporter à l'article : la physique des hautes énergies : les Particules.

l'antiproton comptant pour — 1 puisque la particule correspondante, le proton, compte pour 1.

— *Conservation du spin* : ainsi, la production d'un antiproton de spin $-\frac{1}{2}$ se double de celle d'un proton de spin $\frac{1}{2}$, et le spin total du système reste invariable.

Il existe d'autres grandeurs qui sont — le plus souvent — conservées :

— *La parité*. Si l'opération de symétrie par rapport à un point ne change pas les fonctions définissant un système, la parité est conservée. Il en est ainsi dans les interactions électromagnétiques et les interactions fortes. Au contraire, une interaction faible ne conserve pas la parité.

— *L'étrangeté*, ce qui permet de prévoir la production de particules en paires, pour satisfaire ce principe (Gell-Mann).

Il existe des violations à cette règle. Ainsi, dans la désintégration du Λ^o, le lambda, particule d'étrangeté S = — 1, donne deux particules d'étrangeté 0 :

$$\Lambda^o \longrightarrow p + \pi^o$$

lambda zéro — proton — méson pi

Les règles de conservation ont permis de découvrir les lois des interactions et ont, de ce fait, une importance considérable. Même les violations de ces règles ont un intérêt : la violation de la parité permet de distinguer entre interactions fortes et interactions faibles.

CONVERSION (Conversion) page 515.

On appelle conversion l'opération au cours de laquelle l'énergie passe d'une forme à une autre (exemple : énergie cinétique en énergie calorifique).

En physique nucléaire, la conversion transforme un matériau ne pouvant subir la fission en noyau fissile. Ainsi, l'uranium 238 d'un réacteur à uranium naturel se transforme en plutonium 239 qui, lui, est fissile.

CORPS NOIR (ou radiateur intégral) (Black body)

pages 83, 288, 323, 361, 450, 451, 454.

Un charbon d'arc électrique, lorsqu'on le chauffe, devient rouge, puis blanc éblouissant. C'est un exemple (imparfait) de « corps noir ». On appelle ainsi un corps absorbant parfaitement toutes les radiations qu'il reçoit et, inversement, émettant lorsqu'on le chauffe toutes les radiations (ce qui explique l'éclat du charbon dans l'arc électrique). Le corps noir est soumis à des lois particulièrement simples, d'où son intérêt.

Tous les corps noirs portés à une même température émettent la même énergie (par unité de surface). Cela est vrai pour l'énergie globale, mais aussi pour sa répartition spectrale : une longueur d'onde donnée fournit la même contribution à l'énergie globale. C'est la loi de Lambert.

L'énergie émise par le corps noir est supérieure à celle émise dans les mêmes conditions par tout autre corps. C'est la loi de Kirchhoff.

Enfin, la célèbre loi de Stefan-Boltzmann : la puissance P rayonnée est proportionnelle à T^4, T étant la température absolue.

$P = \sigma T^4$ (T est exprimée en degrés Kelvin ♦),

$\sigma = 5{,}66.10^{-8}$ (système international).

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 14.

L'étude du rayonnement du corps noir fut le point de départ de la théorie de Max Planck (1900) sur la quantification de l'énergie rayonnée. C'est en effet

pour rendre compte de la répartition de l'énergie en fonction de la fréquence des radiations émises et de la température que Planck fut amené à l'hypothèse des « quanta » d'énergie : l'énergie émise par une radiation de fréquence ν l'est par quanta $W = h\nu$, avec $h = 6{,}62 . 10^{-34}$ (constante de Planck).

La formule qu'il établit ♦ : $P = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{k\nu}{kT}} - 1}$

représentait bien le phénomène. Malgré tout, ces quanta sont restés un artifice de calcul jusqu'à l'interprétation de l'effet photoélectrique par Einstein en 1905 et l'hypothèse du photon, qui est à la base de la mécanique ondulatoire ♦.

♦ P : énergie émise à la fréquence ν ;
ν : fréquence ;
k : constante de Boltzmann $= 1{,}38 . 10^{-23}$ J/°K ;
e : 2,7828 (base des logarithmes népériens).
c : vitesse de la lumière ;
T : température (°K).

♦ Voir Einstein, Photoélectrique (effet).

CORROSION (Corrosion)

Attaque destructive d'une paroi par les substances avec lesquelles elle est en contact.

La corrosion atmosphérique est due à l'action combinée de l'humidité et de l'oxygène de l'air (à laquelle il convient d'ajouter celle du gaz carbonique et, éventuellement, des divers sous-produits de notre civilisation : gaz sulfureux, acide sulfurique, composés chlorés, etc.).

La corrosion atmosphérique ou celle qui est due à l'eau de mer ou à l'eau douce sont un phénomène électrochimique, dans lequel les impuretés jouent un grand rôle : le zinc pur est très difficilement attaqué par les acides. De même, le fer très pur ne rouille que très lentement. Deux métaux différents, en contact avec un milieu électrolyte (eau de mer...), constituent les électrodes d'une pile ; il se produira donc, au niveau du métal le moins électropositif, une ionisation de ce métal, donc disparition de celui-ci.

La protection contre la corrosion agit sur plusieurs facteurs : recherche d'alliages ou de métaux adaptés au milieu corrosif, protection par des revêtements (minium, plastification, etc.).

CORPUSCULAIRE (Théorie) pages 87, 102, 207, 288, 290, 305, 331, 339, 352, 487, 489, 497, 500, 514.

COUCHES ÉLECTRONIQUES ♦ (Electron shells) pages 39, 105, 110, 113, 136, 209, 250, 260, 272, 318, 326, 412, 417.

♦ Se reporter à l'article : l'Atome, pages 32 à 44.

Les couches (ou niveaux électroniques) représentent les états dans lesquels peut se trouver un électron lié à un noyau. Elles sont donc caractérisées par l'énergie de cet électron. Celle-ci étant quantifiée, les couches seront discrètes ♦ et caractérisées par un nombre : c'est le nombre quantique ♦ principal n, qui peut prendre toutes les valeurs entières positives.

♦ C'est-à-dire discontinues.

♦ Voir l'article : l'Atome.

On désigne souvent les couches par une lettre : K, L, M, N, O..., qui correspondent respectivement aux couches 1, 2, 3, 4, 5, etc.

En fait, les électrons d'une même couche n'ont pas tous la même énergie. Ils seront caractérisés par d'autres nombres quantiques ; ceux-ci expriment que d'autres grandeurs que l'énergie sont quantifiées.

On trouvera ainsi :

l, nombre quantique secondaire, pouvant prendre les valeurs 0, 1... $n - 1$;

m, nombre quantique magnétique, pouvant prendre les valeurs de $-l$ à $+l$;

s, nombre quantique de spin, pouvant prendre les valeurs $+\frac{1}{2}$ et $-\frac{1}{2}$.

Deux électrons doivent différer par au moins un de leurs nombres quantiques.

Lorsque celui-ci est *s*, on dit qu'ils sont dans la même case quantique et forment un « doublet ♦ ».

♦ Voir Acide.

Un calcul simple montre que le nombre maximal d'électrons sur une couche d'ordre n est égal à $2n^2$.

COULEUR ♦ (Colour) pages 29, 37, 161, 162, 178, 180, 273, 328, 331, 338, 347, 352, 408, 419, 450, 484, 496, 500, 512, 513.

♦ Pour plus de précisions, lire les articles : l'Optique, pages 370 à 378, et : le Cristal, pages 161 et 162.

La lumière visible est composée des radiations électromagnétiques dont la longueur d'onde est comprise entre 0,4 et 0,8 micron ♦. Pour le physicien, la sensation physiologique de couleur est traduite précisément par la longueur d'onde de la radiation reçue par l'œil :

♦ 1 micron = $1\mu = 10^{-3}$ mm.

une longueur d'onde de 0,41 μ correspond à une lumière violette ;
une longueur d'onde de 0,47 μ correspond à une lumière bleue ;
une longueur d'onde de 0,52 μ correspond à une lumière verte ;
une longueur d'onde de 0,58 μ correspond à une lumière jaune ;
une longueur d'onde de 0,60 μ correspond à une lumière orangée ;
une longueur d'onde de 0,65 μ correspond à une lumière rouge.

L'impression colorée que nous percevons quand nous observons un objet dépend à la fois de la lumière éclairant celui-ci et de l'objet lui-même. En effet, nous sommes habitués à la lumière solaire, comportant l'ensemble des radiations visibles (spectre solaire), et que nous considérons comme blanche.

Sous cet éclairage, un objet qui renvoie vers l'observateur toutes les radiations reçues apparaîtra blanc. Un objet qui ne renvoie aucune radiation apparaîtra noir ♦. Une fleur rouge nous apparaîtra ainsi parce qu'elle nous renvoie les radiations rouges et absorbe le reste.

♦ Les artistes définissent le noir comme l'absence de couleur.

Un corps, caractérisé par la lumière qu'il absorbe (spectre d'absorption), nous apparaîtra sous des aspects différents suivant l'éclairage : éclairons-le, par exemple, en lumière comprenant une seule longueur d'onde (lumière monochromatique), la lumière jaune du sodium, par exemple : s'il absorbe cette lumière, il apparaîtra noir. Si le jaune peut être transmis, il nous apparaîtra de cette couleur : la peau prend ainsi une teinte cadavérique peu agréable!

On comprend ainsi que les teintes d'un paysage soient plus « chaudes » au coucher du soleil, la lumière solaire étant à ce moment plus riche en rouge du fait de l'absorption atmosphérique. Inversement, une lumière riche en violet fait apparaître des teintes plus « blanches ».

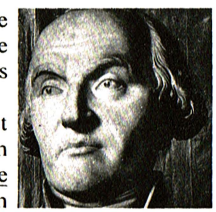
Le phénomène est le même lorsqu'on observe la lumière à travers un verre coloré, qui absorbe une partie des radiations et n'en laisse passer qu'une partie. C'est le principe des filtres couramment utilisés en photographie.

COULOMB (Charles) pages 185, 187, 191.

Physicien français né à Angoulême en 1736, mort à Paris en 1806.

Ingénieur du corps du génie de l'armée, Coulomb se fait envoyer à la Martinique où il construit un fort. De retour en France, il abandonne ses fonctions pour se consacrer à la recherche scientifique. Lauréat, puis membre de l'Académie des sciences, il fait partie de l'Institut dès sa création.

Membre de la commission chargée d'établir un nouveau système des poids et mesures, Coulomb se rend célèbre en découvrant la loi d'attraction et de répulsion électromagnétique qui établit les bases expérimentales et théoriques du magnétisme et de l'électrostatique. Pour vérifier cette loi, il invente la balance de torsion qui porte son nom.



(Viollet)

Charles Coulomb

Les travaux et découvertes de ce grand physicien ne cessent alors de se multiplier. Il découvre la loi de l'inverse carré, constate que la meilleure substance isolante est la gomme laque, développe la théorie de l'électrisation superficielle des conducteurs, énonce l'effet d'écran électrique produit par les conducteurs creux, introduit la notion de moment magnétique et publie un mémoire sur la viscosité des liquides.
Les expériences et résultats de Coulomb, qui serviront de base aux recherches du mathématicien Poisson, peuvent être considérés comme le début d'une connaissance véritablement scientifique de l'électricité.

Ouvrages essentiels :
Théorie des machines simples (Bachelier, Paris, 1821).
Recherches sur les moyens d'exécuter sous l'eau toutes sortes de travaux hydrauliques sans employer aucun équivalent (Bachelier, Paris, 1846).
Mémoires (Gauthier-Villars, Paris, 1884).

COULOMB (Coulomb) pages 103, 139, 529.

Le coulomb (C) ♦ est l'unité de charge électrique du système international. Elle est définie comme la quantité d'électricité traversant en 1 seconde la section d'un conducteur parcouru par un courant de 1 ampère.

♦ Voir le tableau des symboles et unités page 13.

COURANT ÉLECTRIQUE (Electric current) pages 26, 27, 100, 140, 183, 186, 188, 190, 192, 196, 200, 204, 205, 208, 209, 217, 230, 236, 239, 240, 257, 264, 308, 309, 325, 334, 339, 342, 356, 357, 415, 446, 453, 481, 482, 489, 496, 498, 510, 516.

Flux de charges électriques transportées dans un conducteur par des électrons (métaux, semi-conducteurs) ou des ions (électrolytes).
L'unité d'intensité de courant, charge passant dans une section du conducteur pendant une seconde, est l'ampère (A), correspondant à 1 coulomb par seconde.

Courant continu

Lorsque les charges se déplacent toujours dans le même sens, avec une intensité ne dépendant pas du temps, on dit que le courant est continu. Il peut être produit par un accumulateur, une pile, une dynamo.

Courant alternatif

Lorsque l'intensité ne reste pas constante dans le temps, le courant est variable. Ses variations peuvent être telles que l'intensité reprend, à intervalle régulier (période), la même valeur. C'est un courant périodique. Le courant alternatif est un courant périodique qui, de plus, est tel que la charge transportée dans un sens au cours d'une période est égale à la charge transportée dans l'autre sens au cours de cette période.
Un courant alternatif est caractérisé, comme tout phénomène vibratoire, par la durée de sa période, ou sa fréquence, inverse de la période ; le courant industriel a une fréquence de 50 hertz (Hz ♦). En technique téléphonique, on utilise des courants de fréquence 1 000 Hz. Les courants de haute fréquence utilisés dans les émetteurs radio-électriques peuvent atteindre des fréquences de 100 MHz (10^8 Hz).

♦ Unité de fréquence ; nombre de périodes effectuées en 1 seconde.

CRISTAL (Crystal) voir l'article pages suivantes et les pages 82, 86, 91, 109, 174, 176, 181, 196, 210, 236, 253, 255, 264, 268, 271, 273, 327, 331, 334, 342, 347, 353, 357, 449, 481, 485, 490, 491, 496, 498, 501, 502, 504, 530.

Le cristal

par Alain Marraud

L'*Homo faber* a toujours précédé l'*Homo sapiens*. Depuis son apparition sur la Terre, l'homme a utilisé des matériaux solides. Les historiens désignent même les différents stades de la Préhistoire suivant le type de matériau employé : l'Age de la pierre, l'Age du bronze... Et, pourtant, ce n'est que depuis quelques dizaines d'années que nous connaissons réellement ces solides autrement que par des recettes empiriques.

Alain Marraud, né en 1937. Docteur ès sciences. Après avoir enseigné à l'université Laval de Québec, il est actuellement chargé de recherches au C.N.R.S. Il poursuit des recherches sur la microscopie électronique.

Pendant très longtemps, l'homme n'a su que modifier la forme extérieure du matériau, en taillant la pierre, en forgeant le métal. Il lui fallait trouver dans la nature celui qui présentait les propriétés adéquates à un usage particulier. Aujourd'hui, la situation est retournée. D'abord, les ingénieurs déterminent les propriétés du corps dont ils ont besoin, puis, ils le créent, s'il n'existe pas. On sait même fabriquer des solides tellement sophistiqués qu'ils peuvent remplacer des instruments compliqués. Le transistor a supplanté la triode. Aujourd'hui, un circuit intégré est un semi-conducteur qui à lui seul joue le rôle d'un circuit complexe de résistances, de capacités, de bobines, de diodes ♦.

♦ Voir l'article : l'Électronique (transistor, page 239; triode, pages 232-233; circuits intégrés, page 242; diode, pages 229 à 232).

La physique des solides

La nature nous offre une telle diversité de corps solides qu'ils semblent n'avoir qu'un seul point commun, celui d'être... solides. Comment unifier des corps aux propriétés si dissemblables : la vitre qui laisse passer la lumière et la planche de bois qui est opaque ; le métal qui conduit l'électricité et la chaleur, et la pierre qui est isolante ; le plomb malléable et ductile ♦ qui garde la forme qu'on lui a donnée et le ressort qui revient toujours à sa forme initiale ? L'étude de toutes ces propriétés constitue une partie importante et moderne de la

♦ Ductile : qui peut être allongé sans se rompre.

physique, qu'on appelle la physique des solides. Il importe d'abord de bien définir son domaine d'étude et d'application. En effet, le noyau de l'atome est une certaine forme de matière et le Soleil une autre. Mais il est bien évident que les astronomes n'ont ni les mêmes instruments ni les mêmes théories mathématiques que les physiciens nucléaires.

Pour la physique des solides, la matière est un assemblage d'atomes. Les objets qu'elle étudie ont un nombre d'atomes variant entre quelques atomes et quelques millions de milliards de milliards. Un atome mesure quelques angströms ♦, c'est-à-dire un peu moins d'un milliardième de mètre, mais la dimension d'un atome dépend de sa nature : un atome d'or est deux fois plus grand qu'un atome de carbone. Ces objets auront donc des dimensions comprises entre quelques milliardièmes de mètre et quelques centimètres.

♦ 1 angström (Å) : 10^{-4} micron.

Les propriétés physiques que nous observons ont leur origine au niveau des atomes. Mais c'est une double origine : d'une part, la nature de l'atome et, d'autre part, son environnement. La physique des solides est donc fondée sur deux disciplines : l'une, ancienne, datant du XVIIIe siècle, la cristallographie, qui nous informe sur les positions réciproques des atomes ; l'autre, très moderne, la mécanique quantique ♦, qui nous renseigne sur les propriétés des atomes, qui s'intéressera aux problèmes de structures, d'organisation, car les propriétés physiques qui en sont la conséquence sont parmi les plus utiles. Si les métaux ont des propriétés voisines, c'est parce qu'ils ont la même structure et non parce que leurs atomes se ressemblent.

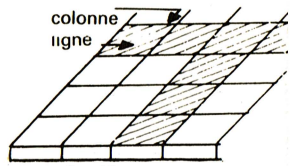
♦ Voir page 339.

L'ordre et la loi

Toute science commence par un classement. Pendant longtemps, on a divisé la matière en gaz, liquide et solide ; or, aujourd'hui, ces distinctions semblent artificielles car elles sont plus fondées sur nos sens que sur la structure intime de la matière. En effet, tous les corps sont composés d'atomes. Pour un corps donné, les atomes peuvent être soit tous identiques, soit différents ; c'est ainsi qu'on distingue les corps simples, ou éléments ♦, des corps composés. Toutes les propriétés chimiques découlent de la nature de ces atomes et de leur liaison à l'intérieur de la molécule. Mais les propriétés physiques se rattachent plutôt à l'arrangement spatial des atomes. Pour comprendre cela, considérons un ensemble d'individus : ils peuvent être « rangés » à la manière de soldats alignés en rangée et en colonne, chacun gardant la distance réglementaire vis-à-vis de ses voisins, ou au contraire dispersés comme une foule se promenant sur un boulevard où règne le désordre le plus complet. Les atomes à leur tour peuvent être soit bien rangés — ils constituent alors un cristal —, soit disposés d'une façon absolument quelconque les uns par rapport aux autres, et ils forment alors un corps amorphe.

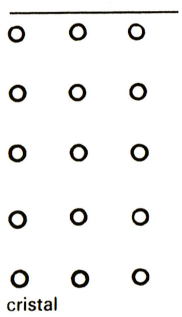
♦ Voir l'article : la Chimie page 106.

Dans un cristal, les atomes sont donc disposés régulièrement. Dans une direction donnée, la distance entre deux atomes demeure constante : on dit qu'ils sont rangés d'une façon périodique. Mais il ne faut pas oublier qu'un cristal est à trois dimensions : on peut disposer les atomes en ligne et en colonne dans un plan, mais on peut aussi disposer ces plans d'une façon régulière les uns au-dessus des autres.

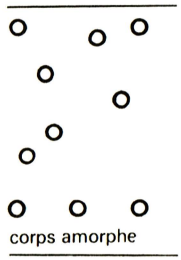


Le cristal est un assemblage ordonné d'atomes

C'est pour cela que l'on définit un cristal comme un corps dont les atomes sont placés de façon triplement périodique. Tous les cristaux sont des solides, puisque les atomes doivent rester à la position qui leur a été assignée. En réalité, les atomes se déplacent un peu autour de cette position. Plus on chauffe le cristal, plus ces déplacements sont importants. Quand ceux-ci deviennent trop importants, la notion d' « ordre triplement périodique » disparaît ; le cristal devrait donc aussi disparaître. C'est en effet ce que l'on observe : quand on chauffe trop un corps solide, il fond. C'est donc la notion d'ordre, c'est-à-dire de disposition régulière (ou périodique), qui caractérise les cristaux.



Par contre, dans un corps amorphe les atomes sont placés n'importe comment. Les liquides et les gaz sont à classer dans cette catégorie. Dans un liquide, les atomes sont très près les uns des autres tandis que, dans un gaz, la distance moyenne qui sépare deux atomes voisins est grande. Dans ces deux cas, les atomes sont toujours en mouvement. Il y a donc désordre et agitation perpétuels, un atome donné peut se propager à travers toute la matière. Certains solides, les verres ou les matières plastiques, par exemple, font également partie des corps amorphes. Leurs atomes sont placés de façon aléatoire les uns par rapport aux autres, mais ils occupent presque toujours la même position.



LES CRISTAUX

Si presque tous les solides sont cristallisés, nous vivons dans un monde de cristaux, ceux-ci ne se trouvant pas seulement dans les musées sous forme de pierres aux surfaces planes et bien définies. Tous les métaux sont des agrégats de petits cristaux microscopiques. Les cristaux nous environnent tellement que nous en mangeons : le sel marin, le sucre, les glaçons sont des cristaux ; que nous en fabriquons : les calculs biliaires, par exemple, sont dus à la fabrication par le foie de minuscules cristaux de cholestérine. La perle formée par l'huître est encore un cristal. L'espace aussi est le royaume des cristaux : les météorites, les pierres qu'on a récemment rapportées de la Lune ont révélé leur structure cristalline.

Les cristaux ne sont pas des pierres qui sont nées avec la Terre et qui disparaîtront avec elle. Nous avons dit que l'homme savait fabriquer des cristaux sans le faire exprès, mais aussi intentionnellement. Le

principe consiste à faire refroidir très doucement un liquide. C'est ce qui se passe dans un congélateur quand on porte de l'eau à une température inférieure à 0°C pour obtenir de la glace. Une autre méthode consiste à évaporer une solution sursaturée, comme cela se produit dans les marais salants où l'eau de mer s'évapore en laissant le sel marin. Aujourd'hui, une industrie s'emploie à créer toutes sortes de cristaux, y compris le diamant ♦. Ceux qui sont fabriqués aujourd'hui n'ont pas encore atteint la taille et la pureté des pierres naturelles, mais ils en ont les mêmes propriétés de dureté, par exemple, et ils servent à des fins industrielles. Les laboratoires de la General Electric aux États-Unis ont même réussi à produire des diamants à partir de cacahuètes!

♦ Le premier auteur d'un tel exploit fut l'Écossais J.-B. Hannay qui, en 1860, fabriqua des minuscules diamants à l'état brut, qu'on peut voir aujourd'hui au British Museum à Londres.

Des « molécules intégrantes » de Haüy aux mailles et réseaux

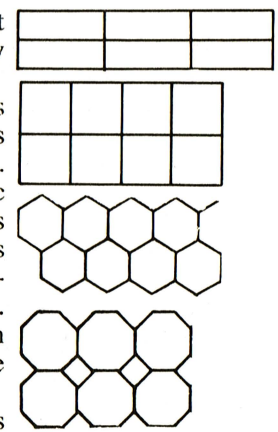
En 1781, l'abbé René-Just Haüy ♦ examina un très bel échantillon de calcite qu'il venait de recevoir. Cet échantillon présentait la forme d'un beau parallélépipède aux faces bien planes et aux angles bien nets. Il examinait et soupesait ce magnifique bloc quand celui-ci lui échappa des mains et se brisa. Très déconfit, il ramassa les débris et s'aperçut avec stupéfaction que les petits morceaux avaient la même forme, en réduction, que le gros bloc. Il réfléchit à ce problème et en conclut qu'un cristal devait être formé à la façon d'un mur de briques, et que sa forme extérieure devait être le reflet de la forme des briques élémentaires, qu'il appela « molécules intégrantes ». Il imagina que ces briques élémentaires étaient d'abord disposées en lignes et en colonnes sur un plan, puis il plaçait un second plan au-dessus du premier, mais en enlevant une ligne ou une colonne de briques ou encore les deux, et ainsi de suite. Une face qui nous paraît bien plane serait en réalité constituée à la façon d'un escalier. En suivant le chemin inverse, il montra que la mesure des angles d'un cristal permettait de retrouver la forme de la petite brique. Il énonça ainsi la « loi des troncatures rationnelles ».

♦ Haüy (abbé René-Just), né en 1743, mort en 1822. Fils d'un tisserand, il succéda à Daubenton comme professeur au Muséum d'histoire naturelle à Paris. Ses découvertes de l'anisotropie des cristaux et de l'existence des éléments de symétrie lui valent d'être considéré comme le père de la cristallographie.

L'existence des molécules et des atomes n'était malheureusement pas encore admise à la fin du XVIIIe siècle, et le travail de Haüy souleva de vives controverses.

Cette séduisante hypothèse d'une architecture mystérieuse dans les solides fut reprise par Bravais (1811-1863). Il montra que ces briques élémentaires ne pouvaient pas avoir n'importe quelle forme. Pour comprendre cela, imaginons le sol d'une pièce à carreler avec des carreaux tous identiques. Pour couvrir entièrement le sol, ces carreaux ne peuvent pas avoir n'importe quelle forme. Des carrés ou des hexagones conviennent, mais pas des octogones ni des pentagones, car il y aurait des petites surfaces de sol non recouvertes ♦. En tenant compte de leur symétrie géométrique, on montre qu'on peut classer tous les cristaux en 32 catégories différentes qui se groupent elles-mêmes en 7 systèmes.

On peut couvrir complètement une surface avec des rectangles (symétrie d'ordre deux), des carrés (symétrie d'ordre quatre), des hexagones (symétrie d'ordre six), mais pas avec des octogones (symétrie d'ordre huit):



Aujourd'hui, on appelle « mailles » ces briques élémentaires, les

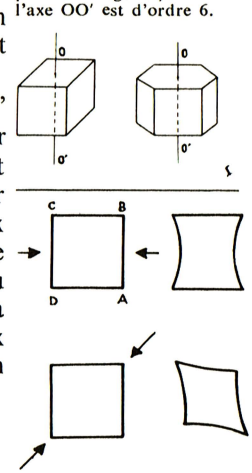
« molécules intégrantes » de Haüy, et « réseau » le dessin formé par la juxtaposition de ces mailles. Mais il faut bien comprendre que maille et réseau ne sont que des constructions de l'esprit qui ne correspondent à rien de matériel dans le cristal.

L'anisotropie

La propriété physique fondamentale d'un cristal est l'anisotropie, c'est-à-dire que toutes les directions ne sont pas équivalentes. Quand on chauffe un corps amorphe, un gaz par exemple, en un point, la chaleur rayonne uniformément ♦ autour de ce point. Par contre, si on chauffe un cristal, la chaleur se propagera plus vite dans certaines directions et moins vite dans d'autres. Un autre exemple de l'anisotropie est le clivage : un cristal se casse facilement suivant certaines directions et difficilement suivant d'autres directions ; ainsi le mica qui se présente sous l'aspect de feuilles superposées. Il est plus difficile de casser ces feuilles que de les séparer. En résumé, dire qu'un cristal est anisotrope revient à dire que seules quelques directions sont équivalentes les unes aux autres. Cette constatation expérimentale se traduit mathématiquement par la notion de symétrie. Il existe une infinité d'opérations mathématiques de symétrie : symétrie par rapport à un point, à un plan, à un axe d'ordre n ♦ (c'est-à-dire rotation de $360^o/n$ autour de cet axe). Par ailleurs, on dit qu'une figure est symétrique si la figure initiale et la figure déduite par la symétrie considérée coïncident. Ainsi, un carré présente un axe de symétrie d'ordre 4 passant par son centre. En effet, si on fait tourner dans son plan un carré de $\frac{360^o}{4} = 90^o$ autour de son centre, on obtient un autre carré, superposable au carré initial. Pour illustrer la relation qui existe entre la symétrie (notion mathématique) et l'anisotropie (propriété physique), imaginons ce carré constitué par des tiges métalliques. Si on exerce une pression au milieu de deux côtés opposés (AB et, par exemple, CD), le carré se déformera d'une certaine manière. Si on exerce maintenant la même pression au milieu des deux autres côtés, la déformation sera semblable à celle de la première expérience. Mais, si on exerce la même pression sur deux sommets opposés, la déformation sera différente. Ainsi, la direction des diagonales n'est pas équivalente à la direction des côtés.

♦ En physique, on dit d'une manière isotrope.

♦ Axe d'ordre n. Exemple : dans la figure ci-dessous, un axe OO′ passe par le centre de 2 faces opposées d'un cube. Une rotation de $90^o = \frac{360^o}{4}$ remplace chacune des faces latérales par sa voisine, et on retrouve la disposition primitive. Cet axe est d'ordre 4. Pour un prisme hexagonal, l'axe OO′ est d'ordre 6.



♦ On représente les atomes groupés sur des plans parallèles et équidistants, formant un réseau régulier.

La classe de symétrie

Par ailleurs, on démontre que la structure réticulaire ♦ du cristal n'est compatible qu'avec un petit nombre d'opérations de symétrie : symétrie par rapport à un point, à un plan et rotations de 180°, 120°, 90° et 60°. Les éléments étant définis, on en cherche toutes les combinaisons possibles et distinctes et on trouve qu'il y en a seu-

lement 32, chaque combinaison étant appelée classe de symétrie. Certaines de ces clauses possèdent des éléments communs permettant de les regrouper en 7 systèmes différents. Chaque système est caractérisé par un solide qui possède tous les éléments de la classe la plus symétrique du système. Ces 7 systèmes sont les systèmes cubique, quadratique, hexagonal, rhomboédrique, orthorhombique, monoclinique et triclinique. Au point de vue mathématique, c'est la théorie des groupes qui introduit le plus élégamment ces notions de classes de symétrie et qui en tire les conclusions les plus fécondes. En faisant intervenir à la fois la symétrie et la translation, on ajoute d'autres éléments de symétrie à ceux définis précédemment et on aboutit à la notion de groupe spatial.

Le réseau

Enfin, il faut se souvenir de l'aspect discontinu que présente le cristal à l'échelle atomique. Bravais a montré que le motif du cristal, c'est-à-dire l'atome ou l'ensemble d'atomes caractéristiques de la nature du corps cristallisé, était placé en certaines positions bien définies du solide spécifique du système cristallin. Par exemple, pour le système cubique, il a montré que les atomes pouvaient être soit seulement aux sommets du cube, soit à la fois aux sommets et au milieu des faces, soit enfin aux sommets et au centre du cube. On obtient ainsi les quatorze réseaux de Bravais qui permettent de décrire toutes les formes cristallines ♦.

♦ Voir page suivante.

LES STRUCTURES CRISTALLINES

Aussi importants que fussent les travaux des premiers cristallographes, ils reposaient malgré tout sur une hypothèse hardie : déduire l'anatomie interne des cristaux à partir de leurs apparences externes pouvait paraître osé et peu sérieux tant qu'on n'aurait pas de preuve directe. Il fallait inventer une technique nouvelle qui permettrait de « voir » les atomes ou, du moins, d'en constater directement l'agencement intime.

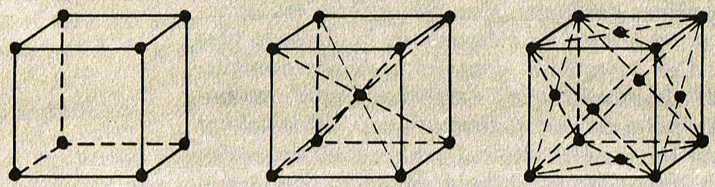
Il faut d'abord remonter en 1895, date à laquelle le savant allemand Röntgen découvrit les rayons X, rayons de nature inconnue qui avaient la propriété de traverser presque tous les corps.

Avec les rayons X, von Laue vérifie l'hypothèse des réseaux

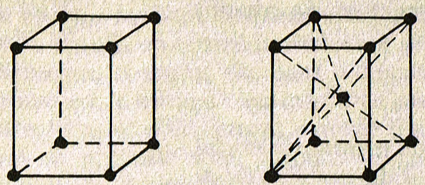
Mais qu'étaient ces mystérieux rayons X ? Était-ce une onde « lumineuse » ou bien des petits projectiles ? Il fallut attendre dix-sept ans avant qu'un jeune professeur allemand, von Laue, en discutant dans une brasserie de Munich avec des collègues, conçût une expérience géniale. On savait depuis longtemps qu'un réseau décompose et diffracte la lumière ♦. C'est une expérience qu'on peut faire soi-même. Si on observe un point lumineux à travers un rideau, on constate

♦ Voir l'article : l'Optique, pages 393 à 395.

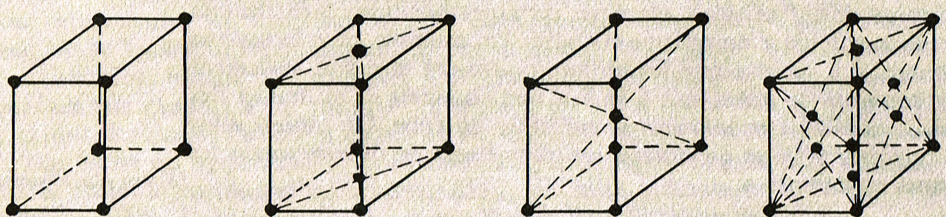
Les 14 réseaux de Bravais



système cubique
Tous les angles sont droits,
toutes les arêtes sont égales

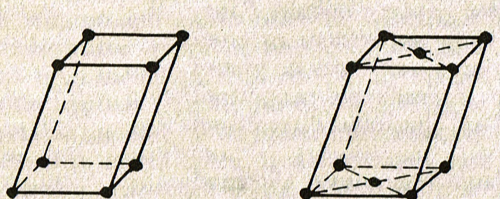


système quadratique
Tous les angles sont droits,
quatre faces sont égales

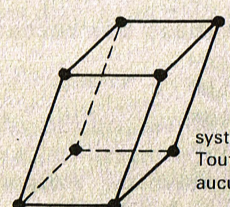


système orthorhombique

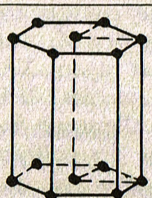
Tous les angles sont droits,
les faces sont égales deux à deux



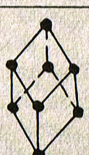
système monoclinique
Comme l'orthorhombique,
mais incliné dans une direction



système triclinique
Toutes les arêtes sont inégales,
aucun angle n'est droit.



système hexagonal



système rhomboédrique
Toutes les arêtes sont égales,
aucun angle n'est droit.

que le point paraît entouré d'un halo multicolore. Von Laue pensa que, si les rayons X étaient de la lumière de très courte longueur d'onde ♦ et que si les atomes étaient aussi régulièrement disposés dans le cristal que les traits d'un réseau, alors le cristal diffracterait les rayons X. On bombarde le cristal avec des rayons X et on place une plaque photographique derrière lui. Si les hypothèses de von Laue sont justes, on doit observer un ensemble de points régulièrement disposés. Von Laue ♦, aidé de deux jeunes assistants, Friedrich et Knipping, fit ce montage et trouva le résultat prédit! Par une seule expérience, il vérifia magistralement deux hypothèses. Les rayons X étaient classés à leur place parmi les ondes électromagnétiques et les cristallographes voyaient leur intuition enfin établie par l'expérience, sans qu'il soit possible de la contester.

♦ La diffraction ne peut se produire que si la lumière passe par des ouvertures ou rencontre des obstacles dont une dimension est de l'ordre de la longueur d'onde de cette lumière (voir l'Optique, Diffraction).

Établissement des structures cristallines : de Bragg aux calculateurs électroniques

Dès lors, tout alla très vite. Deux savants anglais, W.H. Bragg et son fils W.L. Bragg, mirent au point une méthode permettant d'établir les structures cristallines, légèrement différente de celle de von Laue. Ils montrèrent que les atomes se mettaient sur des plans superposés et ils calculèrent la distance entre ces plans. Ils commencèrent par établir la structure du sel de cuisine, formé de chlore et de sodium. Ils trouvèrent que les atomes de chlore se plaçaient aux sommets et au milieu des faces d'un cube de 5,6 Å d'arête et que les atomes de sodium se plaçaient juste au milieu des arêtes du cube. Depuis, avec l'aide de calculateurs électroniques, on sait résoudre la structure des cristaux même les plus compliqués, comme ceux de l'hémoglobine du sang ou ceux du mystérieux A.D.N. ♦, ce corps si important en génétique.

♦ Max von Laue (1879-1960), physicien allemand. Le prix Nobel de physique en 1914 couronna ses travaux sur la diffraction des rayons X par les cristaux (1912) qui démontrèrent à la fois le caractère ondulatoire des rayons découverts par Röntgen et la structure réticulaire des milieux cristallins. On lui doit aussi la théorie dynamique des interférences produites par les réseaux tridimensionnels (1931).

♦ A.D.N. : acide désoxyribonucléique. C'est le constituant principal des chromosomes, véritable support matériel de l'hérédité. La structure de sa molécule est formée de deux chaînes enroulées en spirale et reliées entre elles par des barreaux.

La relation de Bragg

C'est en partant de la structure réticulaire du cristal et par analogie entre la diffraction de la lumière par les réseaux optiques et la diffraction des rayons X par les réseaux cristallins que Bragg a établi sa formule. Soient des atomes régulièrement répartis sur un plan. Si une onde frappe ces atomes sous un angle θ, elle sera réfléchie

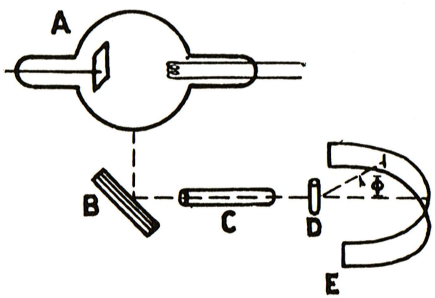
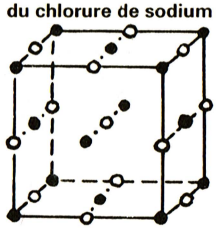


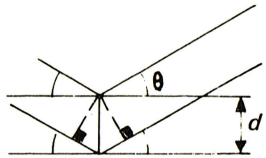
Schéma de l'expérience de Bragg
A : source de rayons X
B : cristal monochromateur
C : collimateur
D : poudre cristalline
E : film photographique
Φ : 180° – 2 Θ
Θ : angle de Bragg
La mesure de Φ (ou de Θ) donne à l'aide de la loi de Bragg la distance entre deux plans d'atomes d'un cristal.

Structure du chlorure de sodium



● ion chlore
○ ion sodium

sous un angle égal à l'angle d'incidence. Considérons maintenant deux plans consécutifs séparés par la distance d, les ondes réfléchies par ces deux plans vont interférer et l'interférence sera constructive si la différence de marche ($2\ d \sin \theta$) est égale à un nombre entier de longueurs d'onde. Considérons un grand nombre de plans équidistants : dans la direction des ondes réfléchies, les interférences seront partout destructives, sauf si $2\ d \sin \theta = n\ \lambda$ (n = nombre entier ; λ = longueur d'onde) ♦.



♦ Voir Interférences.

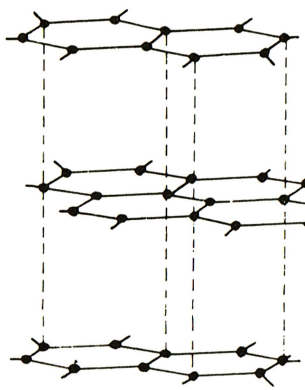
Cette formule peut donc servir à interpréter plusieurs expériences. D'abord, on peut éclairer un cristal inconnu par des rayons X de longueur d'onde connue. On fait tourner le cristal par rapport au faisceau de rayons X et on observe (sur une plaque photographique ou avec un compteur Geiger) à quelle valeur de l'angle d'incidence le faisceau de rayons X est réfléchi. On connaît λ (longueur d'onde), on mesure θ, la formule de Bragg donne alors la valeur de d, qui est la distance entre les plans atomiques du cristal.

On peut aussi prendre un cristal connu, c'est-à-dire un cristal dont on connaît les distances interréticulaires, et l'éclairer par un faisceau polychromatique ♦ de rayons X. Pour un angle d'incidence donné, seule une longueur d'onde satisfera la loi de Bragg et sera réfléchie. En choisissant donc l'angle θ, on sélectionnera la longueur d'onde réfléchie. Le cristal joue ici le rôle d'un monochromateur.

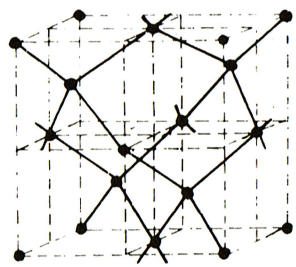
♦ Pour une lumière visible, il s'agit d'un faisceau formé de radiations de couleurs, donc de longueurs d'onde, différentes. Par extension, un faisceau polychromatique de rayons X contient plusieurs radiations de longueurs d'onde différentes. Au contraire, une source monochromatique émet une seule radiation, de longueur d'onde bien définie.

La structure cristalline est vraiment le « squelette » du corps

Dans certains cas, les propriétés physiques doivent être reliées uniquement à l'arrangement des atomes entre eux et non à leur nature. Le diamant et le graphite sont tous deux uniquement composés d'atomes de carbone. Mais l'un est le corps le plus dur qui existe et l'autre est tellement « mou » qu'il peut servir de lubrifiant. Les atomes dans le graphite sont disposés selon des plans superposés. Les forces qui relient les atomes dans un plan sont très importantes, et les atomes sont très rapprochés, mais les plans sont reliés entre eux par de faibles



Structure du graphite (les atomes sont disposés en hexagones sur des plans très espacés les uns des autres)



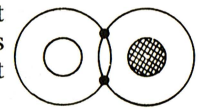
Structure du diamant (les traits pleins représentent les directions des liaisons)

forces et ils sont très éloignés les uns des autres ; il peuvent ainsi glisser les uns sur les autres à la manière d'un jeu de cartes. Au contraire, dans le diamant, chaque atome est à la même distance de ses voisins de droite et de gauche, du haut et du bas, et ils sont reliés entre eux par les mêmes forces. Ils sont disposés sur des lignes en zigzag à trois dimensions qui s'entremêlent. Cette structure est à peu près indéformable et explique la dureté du diamant.

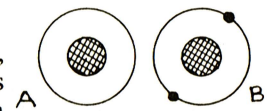
Les liaisons

Les atomes doivent donc occuper des positions bien définies. Mais, si chaque atome reste à sa place, c'est parce qu'il est relié à ses voisins par des forces de liaisons ♦ qui ont leur origine dans l'attraction électrostatique qui s'exerce entre le noyau à charge positive et les électrons chargés négativement. On distingue quatre types de liaisons. Les légères différences qui existent entre elles expliquent pourquoi un corps est conducteur de l'électricité ou isolant, dur ou bien soluble. Le lien le plus fort est la liaison covalente. Deux atomes mettent en commun chacun un électron. Chaque atome-parent peut attirer l'un ou l'autre des deux électrons-enfants. Les deux atomes forment un couple très difficile à briser. Des liaisons de ce type se retrouvent dans le diamant et expliquent en partie sa dureté.
Vient ensuite la liaison ionique. L'un des atomes capture à son seul profit l'électron d'un autre atome. Il devient un ion négatif et l'atome-parent volé devient un ion positif. Le sel de cuisine en est un exemple.
Le troisième type de liaison, appelée liaison métallique, est très curieux. C'est un modèle de société communautaire : chaque atome-parent abandonne un électron-enfant à la communauté et chaque électron rend visite à n'importe quel atome. Tous les atomes ayant perdu un électron sont chargés positivement et ont tendance à se repousser, mais, par contre, tous les électrons négatifs les attirent et les emprisonnent dans une sorte de gelée. Comme son nom l'indique, cette liaison se retrouve dans les métaux.
Les forces de Van der Waals constituent le quatrième type de liaisons Ce sont des interactions compliquées qui ne durent que très peu de temps. Imaginons qu'à un instant donné un atome ait un peu plus d'électrons d'un côté que d'un autre. Comme le noyau est toujours au centre de l'atome, l'effet produit sera identique à celui produit par un aimant électrique où le pôle positif serait le noyau, et le pôle négatif le côté où se trouve un excédent d'électrons. Cet atome va « aimanter électriquement » un atome voisin avec, pour conséquence, une attraction de ces deux « aimants ».
Disons pour finir que, dans un cristal réel ♦, plusieurs sortes de liaisons peuvent coexister, mais l'une d'elles est toujours prépondérante.
En faisant appel à des notions de thermodynamique et de chimie

♦ Voir l'article : la Chimie, pages 112-113.

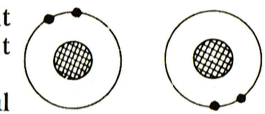


liaison covalente



liaison ionique
(A ion positif; B ion négatif)

liaison métallique



Liaison de Van der Waals
(à un instant donné les deux atomes agissent pendant un bref laps de temps comme des aimants électriques).

représente le « cœur » de l'atome, c'est-à-dire le noyau plus les électrons internes

représente la trajectoire (ou orbitale) de l'électron le plus externe de l'atome

représente l'électron le plus externe de l'atome

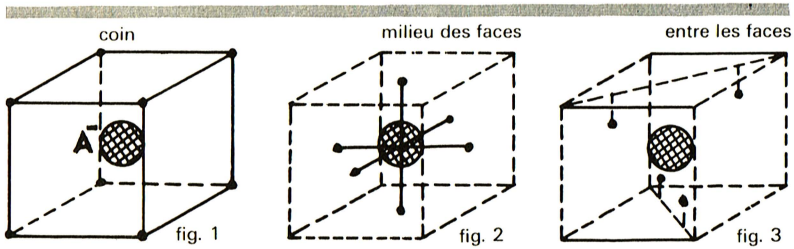
♦ Cristal réel : par opposition au cristal parfait, ou cristal idéal.

générale, on a pu chiffrer l'énergie de ces liaisons qui est généralement exprimée en électrons-volts (*e*V) ♦. L'ordre de grandeur de ces énergies est le suivant :

— liaison covalente : 7 *e*V ;
— liaison métallique : 3,5 *e*V ;
— liaison ionique : de 2 à 15 *e*V ;
— liaison de Van der Waals : de 0,01 à 0,1 *e*V.

♦ 1 *e*V = $1{,}6.10^{-12}$ erg, = $1{,}6.10^{-19}$ joule (voir tableau des symboles et unités, page 13).

Ces valeurs représentent l'énergie nécessaire pour séparer deux atomes réunis par la liaison considérée, ces deux atomes étant placés à leur position d'équilibre. Celle-ci est déterminée par l'équilibre entre la force d'attraction, d'origine électrostatique, qui tend à rapprocher les deux atomes, et la force de répulsion, due au « volume » de l'atome, qui tend à les éloigner. Ces liaisons ont naturellement une influence sur la structure du cristal. Imaginons deux sortes d'ions A^- et B^+, le rayon de l'ion B^+ étant petit. L'ion A^- va chercher à avoir le maximum d'ions B^+ autour de lui. Il en aura au plus huit, et on observera une structure semblable à la structure du chlorure de césium (fig. 1). Faisons grossir les ions B^+. Ceux-ci, bien qu'attirés par l'ion A^-, vont se repousser et, bientôt, il ne pourra plus y avoir que 6 ions B^+ autour de A^- ; c'est la structure du chlorure de sodium (fig. 2). Si les ions B^+ continuent de grossir, ils vont encore plus se gêner et quatre seulement entoureront l'ion A^- ; c'est la structure du chlorure de cuivre (fig. 3).



on n'indique que les emplacements des centres des ions B

Bons et mauvais conducteurs

L'étude des propriétés électriques montre peut-être mieux que toute autre l'extraordinaire diversité des cristaux. Considérons les valeurs de la résistivité électrique : celle d'un bon conducteur (un métal comme le cuivre, par exemple) peut descendre jusqu'à 10^{-6} Ω cm ; celle d'un isolant (ou diélectrique) peut atteindre 10^{19} Ω cm. Il y a peu d'exemples où un paramètre physique peut varier dans de telles proportions. Comment expliquer une telle différence entre le comportement d'un bon conducteur et celui d'un mauvais, puisque tous deux sont constitués d'atomes ?

La conductivité dépend de la présence d' « électrons libres »

Si l'on se souvient qu'un courant électrique résulte d'un passage d'électrons, on peut dire que les électrons traverseront facilement

un conducteur, mais non un isolant. Pour comprendre cela, rappelons-nous qu'il existe plusieurs sortes de liaisons entre les atomes d'un cristal et que ce sont les électrons périphériques des atomes qui sont responsables de ces liaisons. Le mouvement de ces électrons dépendra donc de la nature de la liaison dans laquelle ils sont engagés. Un électron qui assure une liaison covalente entre deux atomes ne pourra se trouver que dans la région qui entoure ces deux atomes et nulle part ailleurs. Ainsi, dans un corps à liaison covalente, les électrons sont très localisés et ne peuvent pas se propager à travers le cristal. Celui-ci sera donc isolant. Les cristaux ioniques sont aussi de bons isolants, car l'électron responsable de la liaison doit rester fortement localisé autour de l'ion négatif et ne peut donc se propager. Par contre, il en va tout autrement pour un métal. Nous avons vu que les liaisons métalliques étaient constituées par des électrons qui vont sans cesse d'un atome à un autre. On les appelle « électrons libres ». Normalement, ces électrons se déplacent au hasard, aussi bien d'un côté que d'un autre, et globalement leurs mouvements se compensent. Mais, si nous appliquons un champ électrique, les électrons vont alors essayer de partir dans la direction du champ. Si l'électricité se déplace à la vitesse de la lumière, il n'en est pas de même pour les électrons. Ceux-ci sont beaucoup plus lents, ils se dirigent dans la direction du champ à la moyenne ahurissante de quelques millimètres à la seconde! Si un corps a beaucoup d'électrons libres, il sera un bon conducteur d'électricité; s'il n'en a pas du tout, ce sera un bon isolant. Notons aussi que ces électrons libres, véritables facteurs du cristal, ne transportent pas seulement l'électricité, mais aussi la chaleur. Si on chauffe le corps à un endroit, les électrons en liberté vont accélérer leur course et frapper plus fort les atomes ainsi que les autres électrons. Ceux-ci vont transmettre cette accélération à leurs voisins et ainsi, de proche en proche, la chaleur sera transmise à tout le corps. On comprend alors pourquoi les métaux sont les meilleurs conducteurs à la fois de l'électricité et de la chaleur.

Théorie de l'électron libre.

Cette théorie s'applique aux métaux et, sous sa forme la plus simple, elle fut énoncée par Drude ♦ en 1900. On suppose que, dans un métal, chaque atome abandonne un ou plusieurs électrons. Ceux-ci constituent un gaz électronique qui occupe tout le volume du cristal, le volume des ions étant négligé en première approximation. Drude a alors appliqué à ce gaz d'électrons les lois de la théorie cinétique des gaz. Il suppose que les électrons se déplacent au hasard et subissent des collisions soit entre eux, soit avec les ions. Après une collision, l'électron repart dans une autre direction, avec une autre vitesse. La vitesse instantanée de chaque électron obéit à la distribution de Boltzmann ♦, mais la vitesse moyenne de tous les électrons est nulle ♦. Si on applique un champ électrique, cette distribution est perturbée et la vitesse moyenne de tous les électrons présente une résultante dans la direction du champ. Partant ainsi de lois

♦ Paul Drude (1863-1906), physicien allemand surtout connu pour ses travaux en optique et sur la théorie électronique des métaux.

♦ Ludwig Boltzmann (1844-1906), autrichien. Professeur de physique, il fut l'un des créateurs de la théorie cinétique des gaz. On lui doit la première représentation de la loi de distribution des vitesses des molécules et l'interprétation de la notion d'entropie qu'il relia à celle de probabilité.

♦ On comprend que la vitesse moyenne des électrons soit nulle. Le contraire signifierait que les électrons auraient un mouvement d'ensemble et leur répartition varierait au cours du temps, ce qui n'est pas le cas.

très générales de la statistique, on retrouve la loi d'Ohm qui relie le courant (ou déplacement moyen des électrons) à la différence de potentiel (dont dérive le champ électrique). Malheureusement, ce modèle très simple aboutit à certaines contradictions qui ne pourront être levées qu'avec l'introduction du caractère ondulatoire de l'électron ♦ (loi de L. de Broglie, 1923) et l'application du principe d'exclusion de Pauli ♦ (1925).

♦ Voir l'article : l'Électronique, pages 208 et 209.

♦ Voir l'article : l'Atome, page 40.

♦ Voir l'article : l'Électronique, pages 236 à 240.

Les semi-conducteurs ♦

L'électronique est la science de l'électron. Toutes ses applications sont dues au fait que l'on sait agir sur un flux d'électrons (direction, vitesse, intensité). Jusqu'en 1948, on ne savait manipuler que des électrons se propageant dans le vide ; tous les montages électroniques utilisaient des « lampes » dont la structure devenait de plus en plus raffinée mais dont le principe remontait à la triode de Lee de Forest ♦. On savait également que les électrons se propageaient plus ou moins bien dans la matière, mais on ne voyait pas comment contrôler leurs mouvements. C'est alors que des ingénieurs américains trouvèrent le transistor ♦. Cette invention non seulement contribua au développement de l'industrie électronique, mais influença son évolution vers une miniaturisation toujours plus poussée. Tous ces progrès n'ont pu être réalisés que grâce à l'emploi des semi-conducteurs, tels que le germanium ou le silicium.

♦ Lee de Forest, ingénieur américain qui modifia en 1906 la lampe diode (due à Fleming) par l'adjonction d'une troisième électrode, la grille créant ainsi la triode d'abord nommée audion. Son invention méconnue le ruina.

♦ Transistor : contraction des mots anglais *Transfert Resistor* (transfert de résistance). Le premier dispositif de ce genre fut inventé en 1948 aux U.S.A. par trois chercheurs de la Bell Telephone Laboratories : Bardeen, Brattain et Schokley qui reçurent pour cette découverte le prix Nobel de physique en 1956.

Des cristaux dopés : les semi-conducteurs, les circuits intégrés

Un métal a une résistivité d'environ 10^{-6} Ω ♦ cm ; celle d'un diélectrique ♦ peut atteindre 10^{19} Ω cm. Les semi-conducteurs (le germanium, par exemple) sont intermédiaires entre les conducteurs et les isolants, leur résistivité se situant entre 10 et 100 Ω cm. A l'état très pur, ces semi-conducteurs sont isolants, car les électrons sont emprisonnés dans des liaisons covalentes. On remplace un atome par un autre de nature différente, à peu près de la même taille, mais qui contient un électron supplémentaire (de l'antimoine ou de l'arsenic, par exemple). Celui-ci ne va pas trouver de place dans les liaisons covalentes. Il va donc être libre et pouvoir se propager dans tout le cristal qui sera ainsi légèrement conducteur. On peut aussi remplacer un atome par un autre qui contient un électron de moins (gallium ou bore) que l'atome original. Cet électron manquant crée un « trou » qui peut se déplacer dans le cristal et agir comme une charge d'électricité positive, l'opposé d'un électron, ce qui rendra encore le cristal conducteur. En effectuant l'une ou l'autre de ces opérations, le cristal aura été dopé.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

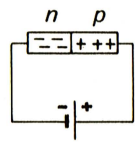
♦ Diélectrique ou isolant.

C'est une opération technique qui demande des soins exceptionnels. L'usine où se fabriquent de tels semi-conducteurs doit être aussi propre qu'une salle d'opération et les techniciens doivent porter une tenue de chirurgien, avec une calotte, pour retenir les poussières des cheveux, et un masque! Il faut d'abord obtenir des cristaux semi-conducteurs d'une pureté extraordinaire, puis ajouter des impu-

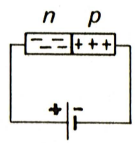
retés, mais dans un rapport extrêmement précis : par exemple, un atome étranger pour un million d'atomes. Pour se représenter cette opération, disons qu'à notre échelle cela consisterait à trier tous les grains de blé d'un sac, puis à ajouter un seul grain d'orge par sac... La plupart des effets de l'électronique sont obtenus en accolant des semi-conducteurs dopés différemment. Maintenant, on réalise des cristaux minuscules qui contiennent des impuretés différentes disposées en ordre successif. On obtient ainsi des « circuits intégrés » monolithiques qui nous font entrer dans l'âge d'une micro-électronique.

Les transistors

Les semi-conducteurs auxquels on a ajouté une impureté sont dits dopés. Si l'impureté apporte des électrons, le semi-conducteur est appelé de type *n*. Dans le cas contraire, le semi-conducteur est de type *p*. Une jonction est la surface d'accolement de deux semi-conducteurs de types *n* et *p*. Lorsqu'on applique une tension directe à la jonction (tension positive sur le type *p* et négative sur le type *n*), le courant peut passer. En effet, les électrons de la région *n* se dirigent vers la région *p* ; les porteurs de charges positives (ou « trous ») de la région *p* se dirigent vers la région *n*. A la jonction, ces deux sortes de charges se combinent et se neutralisent. Mais le phénomène se poursuit, car le générateur prend des électrons à la région *p*, créant ainsi des trous dans cette région, qui vont à leur tour se propager vers la jonction, et il introduit des électrons dans la région *n*. Dans ce cas, la jonction est facilement traversée par un courant appelé courant direct.



tension directe



tension inverse

Si la tension est inverse (tension positive sur le type *n* et négative sur le type *p*), le courant ne peut pas passer : les électrons de la région *n* sont attirés vers le pôle positif du générateur, et les trous de la région *p* vers le pôle négatif. Au voisinage de la jonction, il n'y a plus de charges électriques, donc plus de passage de courant. Finalement, on voit qu'une jonction joue le même rôle qu'une lampe diode ; elle peut donc avoir les mêmes utilisations. Elle peut, par exemple, servir à redresser un courant.

Un transistor ♦ est l'équivalent d'une triode ; il est constitué de deux jonctions. On peut avoir des transistors de type *n-p-n* ou de type *p-n-p*. La première région est l'émetteur, la région médiane, mince par construction, la base et, enfin, la dernière région, le collecteur. La tension est directe sur la jonction émetteur-base et inverse sur la jonction base-collecteur. Quand le courant base est nul, il n'y a pas de courant collecteur, la jonction base-collecteur étant soumise à une tension inverse. Quand il y a un courant base, les charges partant de l'émetteur peuvent traverser complètement la base qui est très mince, avant d'être captées par le collecteur. Il en résulte un courant collecteur. Une petite variation du courant base

♦ Voir aussi l'article : l'Électronique, page 239.

peut produire une forte variation du courant collecteur, et un tel montage joue, comme la triode, un rôle d'amplificateur.

Les supraconducteurs

Au début du XXe siècle, un Hollandais, Onnes ♦, s'intéressait au froid et, pour obtenir des basses températures, il liquéfiait des gaz, d'abord l'hydrogène, puis l'hélium, atteignant ainsi presqu'un degré absolu ♦, soit — 272 °C. Voulant vérifier le comportement de la matière à ces températures, il plongea dans l'hélium liquide des échantillons de divers métaux, sans rien remarquer d'anormal. Le mercure, solide à cette température, devait lui réserver une surprise : il ne présentait plus aucune résistance électrique. Il refit l'expérience en refroidissant progressivement le mercure. Jusqu'à une certaine température, 4°,2 absolus, le mercure présentait une certaine résistance qui s'effondrait au-dessous de cette température. Depuis, on a trouvé d'autres corps présentant cette propriété supraconductrice ♦. On a même construit un anneau supraconducteur ♦ parcouru par un courant. Celui-ci pourrait parcourir l'anneau pendant 100 000 ans sans perdre plus de la moitié de son énergie. En reprenant l'image du métal dont les atomes et les électrons libres se heurtent entre eux et frappent aussi les atomes, la supraconductivité ne peut s'expliquer que si les atomes ne jouent aucun rôle, ne présentent plus aucun obstacle à la course effrénée des électrons. Ce n'est qu'en 1957, quarante-six ans après la découverte de ce phénomène, que trois Américains (Bardeen, Cooper, Schrieffer) en ont donné une explication fondée sur la théorie des quanta.

A très basse température, l'agitation thermique des atomes est très faible. Dans certains métaux (les supraconducteurs), les électrons libres peuvent, par répulsion électrostatique, repousser les atomes ionisés, et ainsi déformer le réseau cristallin. Cette déformation tend à coupler les électrons par paires et fait que les électrons ne peuvent plus perdre de l'énergie. La résistivité du métal est donc nulle. Au-dessus d'une certaine température, l'agitation thermique est suffisante pour dissocier les paires d'électrons et le métal retourne à l'état normal.

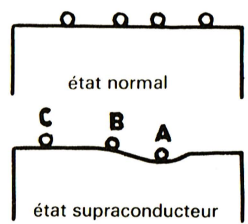
On peut donner une image très grossière de ce phénomène. Imaginons des billes roulant en tout sens sur un matelas. Si le matelas est assez dur, les billes se heurteront entre elles mais n'agiront pas sur la forme du matelas. Si, au contraire, le matelas est très mou, une bille créera une petite dépression sur le matelas. Cette petite dépression attirera une autre bille. Ainsi, à cause de la déformation du matelas, une bille en mouvement en entraînera une autre à sa suite. Dans cette image, les billes représentent les électrons libres et le matelas, le réseau cristallin. La bille A, en roulant, crée une dépression qui attire la bille B, dans son mouvement.

♦ Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926). Hollandais. Prix Nobel de physique en 1913. Professeur de physique, il créa à Leyde le fameux laboratoire du froid où de nombreux physiciens vinrent travailler. Il réalisa le premier la liquéfaction de l'hélium (1908) et découvrit la supraconductivité.

♦ Voir Thermomètre.

♦ Supraconductivité. Cet état se manifeste expérimentalement, d'une part, de par l'absence de résistivité électrique et, d'autre part, par une induction magnétique nulle à l'intérieur du corps supraconducteur, en présence d'un champ magnétique extérieur (effet Meissner). Il faut toutefois que la valeur de ce champ extérieur reste inférieure à une certaine valeur critique, sinon l'état supraconducteur disparaît.

♦ Un anneau de plomb supraconducteur qui aurait été le siège, pendant plus d'un an, d'un courant induit constant de plusieurs centaines d'ampères, a été construit au Massachusetts Institute of Technology.



D'où provient la couleur ?

Un cristal naturel, tel que le quartz, le diamant ou le sel de cuisine, est généralement transparent et ne représente pas de couleur spéciale. D'autres corps montrent une coloration particulière qui est due à la nature de leurs atomes ♦ ; ainsi l'or est jaune et le cuivre pur, rouge. On serait donc tenté de dire que la couleur d'un corps ne dépend que de sa nature. Malheureusement, les choses ne sont pas si simples. Le rubis est rouge et le saphir est bleu. Mais, fait troublant, ces deux corps sont en réalité des cristaux d'alumine Al_2O_3, de même composition et de même structure. La situation se complique quand on sait que ce cristal, Al_2O_3, à l'état pur est incolore. Comment un même cristal peut-il alors être rouge ou bleu, ou incolore ? Cette propriété insolite s'explique par la présence d'impuretés, d'un petit nombre d'atomes étrangers qui imposent leur loi à tout le cristal occupé. Ce sont des atomes de chrome, un ou deux pour mille atomes d'aluminium, qui sont responsables de la couleur rouge du rubis. Le bleu du saphir est dû à quelques atomes de titane ♦.

Une autre expérience, très récente, met en jeu un cristal et la lumière. Ses résultats sont tellement extraordinaires qu'une nouvelle discipline de la physique s'est créée : c'est l'optique non linéaire ♦, et de nombreux physiciens étudient aujourd'hui ce phénomène. Lorsqu'on éclaire certains cristaux par une lumière très puissante et monochromatique ♦, par exemple la lumière rouge issue d'un laser à rubis, après traversée du cristal on obtient de la lumière ultra-violette. Ce phénomène a sa cause dans l'énorme puissance contenue dans le faisceau laser et ne peut être expliqué qu'en faisant appel à la mécanique quantique.

Classiquement, on écrit que, dans un diélectrique, la polarisation $\vec{P}$ est reliée au champ électrique $\vec{E}$ par la susceptibilité $\varkappa$ du milieu : $\vec{P} = \varkappa\vec{E}$. Mais cela n'est qu'une approximation du premier ordre. En toute rigueur, on a $\vec{P} = \varkappa\vec{E}\left(1 + a_1\vec{E} + a_2\vec{E}^2 + \ldots\right)$. Soumettons le diélectrique à un champ sinusoïdal $\vec{E} = \vec{E}_0 \sin\omega t$.

On aura $\vec{P} = \varkappa\vec{E}_0 \sin\omega t + a_1\vec{E}_0^2 \sin^2\omega t + \ldots$

$$= \varkappa\vec{E}_0 \sin\omega t + a_1\varkappa\vec{E}_0^2 \frac{1}{2}(1 - \cos^2\omega t) + \ldots$$

On voit ainsi apparaître le terme harmonique en 2ω.

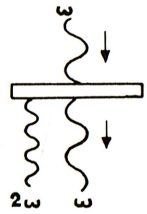
Une expérience d'optique non linéaire consiste à éclairer fortement, à l'aide d'un laser, un cristal (il faut un fort champ électrique pour que cet effet se manifeste, car les corrections — termes en a_1, a_2 ... — sont très faibles devant 1. Après traversée du cristal, on obtient à la fois une lumière de même fréquence que la lumière incidente et une lumière de fréquence double. Remarquons qu'un cristal qui présente cet effet ne peut pas avoir un centre de symétrie. Si tel était le cas,

♦ Considérons un atome composé d'un noyau et d'un électron, celui-ci n'ayant que deux orbites permises. A chacune de celles-ci correspond une énergie de l'électron. Si celui-ci décrit l'orbite 1 (symbolisée par un cercle) il possède l'énergie E_1, s'il décrit l'orbite 2, son énergie sera E_2, avec $E_2 > E_1$. Si l'électron initialement sur l'orbite 2 tombe sur l'orbite 1, il va perdre de l'énergie. Cette perte va se traduire par l'émission d'une lumière monochromatique de fréquence ν, telle que $h\nu = E_2 - E_1$ (h = constante de Planck).
Si l'électron est sur l'orbite 1 et est éclairé par une lumière monochromatique de fréquence ν, il va pouvoir absorber un quantum d'énergie $h\nu$ et monter sur l'orbite 2. Cette différence d'énergie $E_2 - E_1$ est caractéristique d'un atome donné. Chaque sorte d'atome émettra, ou absorbera, une lumière dont la couleur lui sera spécifique.

♦ Titane : métal blanc (masse atomique : 47,9 ; numéro atomique Z = 22) utilisé dans l'industrie aéronautique pour la réalisation d'alliages résistant à un échauffement intense (avant de *Concorde*, etc.).

♦ Voir l'article : l'Optique, page 406.

♦ Lumière qui ne contient qu'une seule couleur.



quand $\vec{E}$ change de signe, $\vec{P}$ devrait aussi changer de signe, ce qui entraînerait $a_1 = 0$. On voit dans cet exemple l'importance de la notion de symétrie abordée plus haut ♦.

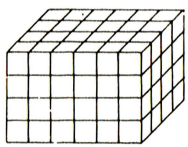
♦ La notion de symétrie ne sert pas seulement de critère pour décrire et classer les cristaux, elle peut aussi indiquer quelles sont les propriétés physiques possibles du cristal. Le principe de Curie, qui traite de cette symétrie des phénomènes physiques, est certainement l'un des postulats les plus fondamentaux de la physique.

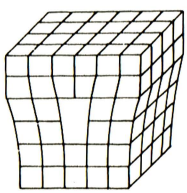
LA DISLOCATION DU CRISTAL

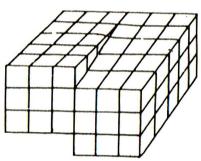
A l'aide des rayons X, les cristallographes étudient la position des atomes dans le cristal, l'anatomie de son squelette en quelque sorte. Mais celui-ci peut présenter des fractures, des défauts ; c'est ce qui se passe avec la presque totalité des cristaux. Heureusement, d'ailleurs, car, suivant son défaut, le cristal présente telle ou telle propriété.

L'alliage est un cristal « pathologique »

L'art de l'ingénieur des matériaux est de donner un défaut bien spécial au cristal, de le rendre pathologique, afin de s'en servir pour un usage déterminé. Si un fil d'or très pur se plie sans se casser — on dit que le métal est ductile —, on est bien obligé d'admettre que les atomes d'or peuvent se déplacer. Par contre, l'or utilisé en joaillerie, qui est en réalité un alliage, est résistant et se casse si on le soumet à une trop grande force. Si on ajoute des atomes étrangers, ceux-ci bloquent le mouvement des atomes d'or. Certes, il y a longtemps — depuis l'âge de bronze — que les hommes savent qu'un métal très pur est mou et malléable et qu'un alliage est dur et résistant. Mais ce n'est qu'en 1934 qu'un Anglais, Taylor, a émis une explication vraisemblable. Et il a fallu attendre 1957 pour que celle-ci soit vérifiée expérimentalement. C'est un défaut de structure, la dislocation, qui est la cause de la ductilité des métaux. Dans le cas idéal, les plans d'atomes sont nettement séparés, parallèles les uns au-dessus des autres à la manière des marches d'un escalier. S'il y a une dislocation, ces plans sont légèrement inclinés et on passe, d'une matière continue, à l'étage supérieur, comme un filetage de vis. Les atomes peuvent alors facilement glisser le long de cette vis quand celle-ci monte en tournant sur elle-même. La dislocation se déplace sous l'action du mouvement des atomes. A notre échelle, le métal se déforme facilement, il est ductile. Si un atome étranger pénètre dans le métal, il arrête la montée de la dislocation, bloquant du même coup le mouvement des atomes. Le métal, ou plutôt l'alliage — puisque le corps n'est plus pur —, devient dur et cassant. Dans certains corps, comme le diamant, les atomes sont répartis d'une façon tellement compliquée qu'ils empêchent eux-mêmes la dislocation de se mouvoir. De tels corps, même à l'état pur, sont naturellement durs.


cristal parfait

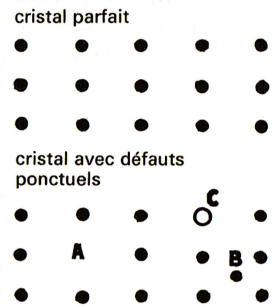

dislocation coin


dislocation vis

Les défauts

Un cristal idéal est un cristal dont les atomes occupent exactement les positions prévues par la théorie. Mais un cristal réel ne correspond pas à ce modèle. Il présente des défauts. Ceux-ci peuvent être

ponctuels ; par exemple, un atome qui manque ou un atome de trop, ou encore un atome à la bonne place mais de nature différente : c'est une impureté, et on a vu l'importance de ces défauts pour la réalisation des transistors.
Les défauts peuvent aussi être linéaires, comme les dislocations. Celles-ci peuvent être du type vis ou du type coin ; ce dernier correspond à l'introduction d'un demi-plan supplémentaire d'atomes. Ils peuvent être superficiels ; par exemple, toute surface du cristal est un défaut, car l'empilement régulier des atomes s'interrompt. Dans certains álliages, il existe aussi des défauts de volume. Tous ces défauts sont quasi-statiques, c'est-à-dire qu'ils restent immobiles dans le cristal ou se déplacent relativement lentement.



en A une lacune (un atome manque)
en B un interstitiel (un atome en trop)
en C une impureté (un atome différent)

Il existe une autre classe de défauts, dits dynamiques, qui correspondent à des mouvements rapides. Par exemple, dans un cristal idéal, les atomes devraient occuper une place fixe. On a déjà vu qu'il n'en était pas ainsi et que les atomes se déplaçaient autour de leur position d'équilibre. Ce déplacement constitue un défaut appelé phonon, qui joue un grand rôle dans l'étude des propriétés thermiques.

Un cas particulier

On appelle quelquefois cristal une verrerie fine, de valeur (une coupe de cristal). Pour un physicien, c'est un contresens, car le verre est l'un des rares corps solides qui se présentent sous une forme amorphe. On peut se le représenter sous forme d'un liquide extrêmement visqueux, mais cette structure n'est pas un état d'équilibre. On peut aussi fabriquer des cristaux qui ont la même composition chimique que le verre, mais des propriétés physiques différentes. Un chercheur de Corning Glass, étudiant un nouveau type de verre, le fit cuire dans un four, qu'il oublia d'éteindre. Le lendemain, lorsqu'il sortit le verre surchauffé, par mégarde il le laissa tomber. A sa stupéfaction, au lieu de se briser, celui-ci rebondit. L'analyse montra qu'il avait une structure cristalline. Ce nouveau matériau très résistant sert aujourd'hui à la construction d'ogives ♦ de fusée.

♦ Ogive : partie avant d'une fusée, ainsi appelée en raison de sa forme.

Les polymères

Les corps amorphes sont de plus en plus étudiés, car de plus en plus utilisés. Notre vie serait, en effet, impossible sans l'existence des polymères. C'est grâce à eux que nous mangeons, que nous nous vêtissons, que nous habitons une maison et non une grotte. Le bois, la laine, le coton, la fourrure, le caoutchouc, le papier, les huiles en font partie. Ces corps naturels sont composés de grosses molécules organiques très complexes et très fragiles. Il a fallu attendre 1920 pour trouver des méthodes capables de les analyser sans les détruire.

Presque tout de suite est née une très grande industrie : celle des matières plastiques.

Les matières plastiques : des polymères fabriqués synthétiquement

Sous ce nom se cachent des matériaux aux propriétés diverses. Le nylon peut servir à fabriquer des bas plus souples que la soie ou des engrenages plus durs que l'acier.

Cette industrie a rapidement prospéré. Alors qu'en 1930 le volume des polymères fabriqués était le centième du volume de l'acier, aujourd'hui ces deux productions ont des volumes comparables. Les principaux produits sont les fibres, les matériaux d'emballage, les colles et une multitude d'objets divers. Les tendances actuelles pour trouver de nouveaux débouchés à ces produits vont vers la fabrication des matériaux de construction utilisables non seulement pour les maisons, mais aussi pour les automobiles, les avions et les bateaux.

Le mot polymère ♦ décrit bien l'architecture de ces corps. Il sont formés de macromolécules. Celles-ci sont construites à la manière d'un train. 50 ou 100 ou 150 molécules organiques identiques (ou monomères) sont rattachées les unes à la suite des autres. Avant de pouvoir réaliser synthétiquement de tels corps, plusieurs problèmes se sont posés : il fallait d'abord créer la molécule unité, puis rattacher ces molécules entre elles. La première étape était facile pour les chimistes, la seconde beaucoup moins. Cette « polymérisation » s'effectue en combinant la chaleur, des fortes pressions et des catalyseurs ♦.

♦ Du grec *poly*, = beaucoup, et *meros* = partie.

♦ Agents qui aident la réaction chimique.

Les chaînes ainsi réalisées peuvent se grouper de plusieurs manières :

1. Elles peuvent s'entremêler pour donner une structure amorphe.
2. Il peut y avoir des domaines de cristallisation ; elles présentent un certain ordre sur une partie de leur longueur ; le matériau dans son ensemble se présente donc comme une multitude de cristaux microscopiques noyés dans un ciment amorphe.
3. Les chaînes peuvent aussi s'orienter mutuellement, se plaçant toutes parallèles à une même direction.
4. Elles peuvent se présenter sous la forme d'une hélice.

Suivant la manière de groupement choisi, on obtiendra telle ou telle propriété. Un polymère à prédominance cristalline sera résistant et rigide, tandis que son voisin de type amorphe sera mou et déformable. Les polymères à chaînes parallèles serviront comme fibres textiles (la cellulose se compose de longues chaînes parallèles bâties à partir de la molécule de sucre). Enfin, des polymères à chaînes hélicoïdales présenteront une élasticité remarquable (les macromolécules d'isoprène qu'on rencontre dans le caoutchouc ont la forme de petits ressorts).

Il ne suffit pas d'avoir fabriqué des monomères, puis de les avoir réunis entre eux sous forme de chaînes, pour faire un plastique. Il faut encore attacher ces chaînes les unes aux autres pour en faire un solide. On a déjà vu deux types d'attaches : si les chaînes sont assez rigides

et se croisent un certain nombre de fois (premier type de structure), l'ensemble est suffisamment lié pour être solide. La cristallisation est aussi un mode de liaison, donnant des corps particulièrement durs. La troisième manière est d'attacher chimiquement les chaînes entre elles. Par exemple, des atomes de soufre forment avec les molécules du polymère des liaisons chimiques très fortes. En augmentant le nombre de liens, on augmente la rigidité du corps : dans le caoutchouc synthétique, servant à fabriquer les pneus, les atomes de soufre sont assez rares pour laisser au corps sa souplesse ; si on augmente le nombre d'atomes de soufre, on obtient un corps très dur, l'ébonite. En réalité, ces modes de liaisons peuvent se combiner entre eux, permettant ainsi la création de matériaux multiples, chacun ayant son utilisation spécifique.

Un cristal vivant

L'une des plus extraordinaires photographies a été prise récemment avec un microscope électronique. Elle montre un virus, celui d'une maladie du tabac, cristallisé ! Un jour, peut-être, comprendra-t-on que cette photo marque une étape décisive sur le chemin qui conduit aux origines de la vie. Normalement, le virus est l'être vivant le plus simple qui existe, mais c'est un être vivant capable de se reproduire et qui possède les principales fonctions vitales. Un cristal, c'est de la matière ordonnée, organisée, mais de la matière inerte et inanimée.

Un lien entre le vivant et l'inanimé : un virus cristallisé

Rien n'est encore expliqué, mais on comprend pourquoi aujourd'hui de nombreux physiciens du solide, imitant Pasteur, jettent un coup d'œil vers la biologie et créent une nouvelle science : la biophysique. Comme ils savent à peu près ce qui se passe dans des solides relativement simples, peut-être auront-ils quelques idées sur les processus qui se déroulent à l'intérieur des tissus vivants, infiniment plus complexes.

Laissons C. S. Smith ♦ conclure ce chapitre : « Il y a une continuelle hiérarchie de structures et d'interactions : les particules élémentaires, les noyaux, les atomes, les cristaux, les cellules, les roches, les plantes, les animaux, les sociétés, les montagnes, les continents, les planètes, les étoiles, l'Univers. Chacune à sa structure spécifique. Pour les étudier, nous les avons divisées en catégories séparées, une échelle à la fois ; cependant, la valeur de toutes réside dans le fait qu'il y a une relation entre les échelles. Comme les propriétés de la structure sont aussi importantes que celles de l'unité, de nouvelles méthodes de pensée vont inévitablement se développer... Si les principes de la structure hiérarchisée ont pu être adéquatement développés pour aider la science de la matière, ils pourront peut-être aussi s'appliquer d'une autre façon aux organismes biologiques et même aux sociétés humaines ♦ .»

Alain Marraud.

♦ Cyril Stanley Smith est professeur au Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.). Né en Angleterre, il vit aux États-Unis depuis 1924.

♦ Extrait d'un article de C. S. Smith publié dans *Scientific American* (sept. 1967).

CRISTALLISATION (Crystallization) pages 114, 318, 503.

C'est presque un synonyme de solidification ; la cristallisation fait passer un corps liquide à l'état cristallin et s'effectue, sous une pression fixée, à une température fixe qui caractérise le corps.
Le résultat final est en général un enchevêtrement de cristaux microscopiques. Lorsqu'on veut obtenir des cristaux plus gros (monocristaux) — cristaux de germanium, pour transistors♦, par exemple —, on opère par refroidissement lent à partir d'un « germe ♦ » (microcristal) qu'on soulève lentement de la masse liquide.

♦ Voir l'article : l'Électronique, page 239.
♦ Voir l'article : le Cristal, page 158.

CRITIQUE ♦ (masse) (Critical mass) pages 75, 509.

Masse minimale de matière fissile permettant à une réaction en chaîne de se produire soit dans un réacteur nucléaire, soit dans une « bombe atomique ».

♦ Pour plus de précisions, lire l'article : l'Atome, page 75.

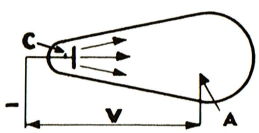
CROOKES (sir William) pages 196, 205, 338.

Chimiste et physicien anglais, né à Londres en 1832, mort en 1919.
Assistant de chimie au Royal College à vingt ans, Crookes inaugure une brillante carrière. Successivement attaché au département météorologique d'un observatoire, professeur de chimie et directeur d'une grande revue scientifique, il est anobli, puis élu membre de la Royal Society et correspondant de l'Académie des sciences. Crookes s'intéresse à des problèmes fort divers. Il s'occupe aussi bien de sucre de betterave et de construction d'égouts que d'études sur le spiritisme et sur les recherches psychiques de son époque. Toutefois, sa grande notoriété vient principalement de la découverte du thallium qu'il parvient à isoler en 1861 grâce à l'analyse spectrale. Au cours de ces recherches, ses observations sur la curieuse conduite de cet élément lors d'une pesée dans le vide l'amènent à construire le radiomètre.
Le nom de sir William Crookes est également lié à des travaux de natures très diverses. Il met en évidence les remarquables propriétés du rayonnement cathodique dont il explique les effets par la projection de molécules par la cathode. Il développe ainsi sa théorie du « quatrième état » de la matière qu'il dénomme « radiante ». Inventeur du spinthariscope, il met en évidence la présence du sel de radium en produisant de la phosphorescence sur un écran au sulfure de zinc.

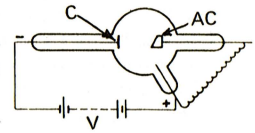
Ouvrages essentiels :
Nouvelles expériences sur la force psychique (Paris, 1886).
La Genèse des éléments (Gauthier-Villars, Paris, 1887).
Recherches sur les phénomènes du spiritualisme (B.P.S., Paris, 1923).

CROOKES (Tube de) (Crookes' tube) page 498.

Tube à rayons cathodiques
Un tube de Crookes est un tube dans lequel on a fait un vide assez poussé (la pression du gaz restant est de l'ordre de 1/1 000 de mm de mercure).
Une tension V de quelques milliers de volts, appliquée entre une cathode C et une anode A, provoque un champ électrique qui attire vers la cathode les ions positifs existant dans le gaz. Cette cathode, sous l'action de ce bombardement, émet des électrons constituant les rayons cathodiques.



Tube à rayons X



Dans le tube de Crookes à rayons X, les électrons émis selon le mécanisme précédent sont dirigés sur une pièce métallique, l'anticathode AC, où ils provoquent l'émission de rayons X.
Le tube de Crookes n'est plus guère utilisé que dans des montages de démonstration, car il ne permet pas de régler séparément l'intensité et la pénétration du faisceau X émis.

CRYOGÉNIE (Cryogenics) pages 258, 412.

Production de froid, dans le but d'atteindre des températures très basses (voisinage du zéro absolu ♦ : — 273°C).

♦ Voir Thermomètre.

On obtient facilement des températures basses à l'aide de gaz liquéfiés. Voici quelques températures d'ébullition sous la pression atmosphérique, c'est-à-dire la température à laquelle se stabilisera le liquide pendant la durée de l'ébullition :

azote : 77,5 °K ♦ ou — 195,6°C
oxygène : 90 °K ou — 183,1°C
hydrogène : 20,4 °K ou — 253,7°C
hélium : 4,3 °K ou — 268,8°C

♦ K ou Kelvin (voir le tableau des symboles et unités, page 14).

La course au zéro absolu a amené à utiliser des méthodes très diverses. Ainsi, la désaimantation d'un cristal paramagnétique, préalablement plongé dans l'hélium liquide, refroidit ce cristal. On a ainsi pu atteindre des températures inférieures à 0,01 °K. On ne peut parler de cryogénie sans citer Kammerling Onnes ♦ qui, dans son laboratoire de Leyde, avait observé dès 1911 la supraconductivité des métaux au voisinage du zéro absolu.

♦ Voir l'article : le Cristal, page 160.

CURIE (Curie)

Le curie est une unité de radioactivité. C'est la quantité de substance radioactive dans laquelle il se produit 37.10^9 désintégrations par seconde.
On utilise plus habituellement le millicurie, qui correspond à l'activité d'environ 1 g d'uranium naturel.

CURIE (Pierre et Marie) pages 25, 57, 82, 201, 328, 427, 452, 486, 519.

(Viollet).
Pierre Curie

(Viollet).
Marie Curie

Couple de physiciens français : Pierre, né à Paris en 1859, mort en 1906 ; Marie, née à Varsovie en 1867, morte près de Sallanches en 1934.
Étroitement associés à l'extraordinaire découverte du radium, les noms de Pierre et Marie Curie sont devenus légendaires dans l'histoire universelle de la science. Préparateur à la Faculté des sciences de Paris, puis chef de laboratoire et professeur à l'École de physique et chimie, Pierre Curie fait, en collaboration avec son frère aîné, ses premières recherches sur la piézoélectricité et sur les propriétés magnétiques des corps à une certaine température, dénommée d'ailleurs le « point de Curie ». En 1895, il épouse Marie Sklodowska, jeune étudiante polonaise travaillant dans son laboratoire. Dès lors, leurs deux noms sont indissociables. A la suite de la découverte de Becquerel sur les propriétés radioactives de l'uranium, ils se consacrent à l'étude de ce phénomène. Ayant l'intuition de l'existence d'un élément chimique plus radioactif que l'uranium, ils se lancent dans des recherches sur la pechblende. En 1898, après des mois et des mois de recherches épuisantes, ils réussissent à isoler le polonium, puis, en 1902, le radium. Ils reçoivent alors, avec Henri Becquerel, le prix Nobel de physique pour 1903. Par la suite, ils

continuent à étudier les propriétés du radium et de ses produits de transformation. Lorsque Pierre Curie meurt accidentellement en 1906, il lègue à la science diverses inventions. Marie Curie est alors nommée titulaire de la chaire de physique générale qu'occupait son mari et devient ainsi la première femme chargée d'un enseignement supérieur. Prix Nobel de chimie pour 1911, fondatrice de l'Institut du radium, elle poursuit ses recherches, découvre la radioactivité du thorium et isole le radium à l'état métallique. Mondialement connue et honorée, Marie Curie meurt en sanatorium, les os rongés par l'action des rayons.
Modeste, sensible et maternelle, Marie Curie reste l'image d'une femme qui sut allier le génie scientifique au dévouement et à la grâce. Quant à Pierre Curie, les paroles qu'il prononça en 1905 devant l'Académie des sciences de Stockholm sont un reflet éloquent de ses préoccupations : « ... Dans des mains criminelles, le radium pourrait devenir très dangereux et, ici, l'on peut se demander si l'humanité a avantage à connaître les secrets de la nature, si elle est mûre pour en profiter. »

Ouvrages essentiels :

1. Pierre Curie :
Propriétés magnétiques des corps à diverses températures (Gauthier-Villars, Paris, 1895).
Œuvres (Gauthier-Villars, Paris, 1908).
2. Marie Curie :
Recherches sur les substances radioactives (Gauthier-Villars, Paris, 1904).
Traité de radioactivité (Gauthier-Villars, Paris, 1910 ; Hermann, Paris, 1935).
Pour le développement de l'Institut du radium de Paris et pour l'avenir de la radiumthérapie en France (Institut du radium, Paris, 1920).
La Radiologie et la guerre (Alcan, Paris, 1921).
L'Isotopie et les éléments isotopes (P.U.F., Paris, 1924).
Pierre Curie (Payot, Paris, 1924 ; Denoël, Paris, 1955).
Radioactivité et phénomènes connexes (E. Chiron, Paris, 1926).
Les rayons α, β, γ des corps radioactifs en relation avec la structure nucléaire (Hermann, Paris, 1933).

CURIE (Principe de) : voir le Cristal page 162.

CURIE (Point de) (Curie Point) pages 29, 167, 200, 202, 203, 412, 536.

Température de passage d'un corps de l'état ferromagnétique à l'état paramagnétique ♦ : le point de Curie pour le fer est de 770 °C. ♦ Voir ces mots.

CYBERNÉTIQUE (Cybernetics)

« Ensemble des théories groupant les études relatives aux communications et à la régulation dans l'être vivant et la machine. » Telle est la façon dont Norbert Wiener, le fondateur de la cybernétique, la définit.
L'étymologie est claire : la racine grecque *kebernétiké* est celle qui, à travers le latin *gubernare*, a donné gouverner (au sens de piloter un navire). Il n'est donc pas étonnant que l'une de ses applications soit précisément le pilotage automatique de bateaux ou d'avions.
En dehors des aspects biologiques et psychologiques de la cybernétique (étude des mécanismes de la mémoire, de l'apprentissage), la cybernétique est à la fois la science de l'établissement des programmes permettant la réalisation d'une opération donnée et la technique de construction des appareils nécessaires.

Vue sous cet angle, elle constitue un des aspects de l'information : l'établissement du programme étant une affaire de matière grise (« software ») et la machine une affaire de quincaillerie (« hardware ») ♦.

♦ Voir l'article : l'Électronique, page 246.

Dans une installation de pilotage automatique, on trouvera ainsi :

— un programme : la route à suivre, ou un programme plus élaboré, tel que la trajectoire complète d'un point de départ au point d'arrivée ;

— un organe de commande donnant des ordres aux gouverneurs en vue d'exécuter le « programme » ;

— des organes de détection des écarts avec la route prévue par le programme, tout écart entraînant en retour la boîte de commande en vue de la correction de cet écart (on trouve ici la notion fondamentale de boucle de retour, ou feed back).

CYCLE (Cycle) pages 129, 130, 307.

Suite de transformations ramenant un système dans un état identique à son état initial.

CYCLE de BETHE (Bethe's cycle)

Série de transformations subies par un atome de carbone, imaginées par le physicien Bethe ♦ pour expliquer les hautes températures du Soleil et de la plupart des étoiles.

♦ Hans Albrecht Bethe, physicien allemand, né à Strasbourg en 1906, Prix Nobel de physique en 1967.

Pour Bethe, il se produirait successivement :

${}^{12}_{6}C$ ♦ + ${}^{1}_{1}H$	⟶	${}^{13}_{7}N$ azote 13	(fusion)				
${}^{13}_{7}N$	⟶	${}^{13}_{6}C$ carbone 13	+	e^+ positron	+	ν neutrino	(radioactivité β^+)
${}^{13}_{6}C$ + ${}^{1}_{1}H$	⟶	${}^{14}_{7}N$ azote 14	(fusion)				
${}^{14}_{7}N$ + ${}^{1}_{1}H$	⟶	${}^{15}_{8}O$ oxygène 15	(fusion)				
${}^{15}_{8}O$	⟶	${}^{15}_{7}N$ azote 15	+	e^+	+	ν	(radioactivité β^+)
${}^{15}_{7}N$ + ${}^{1}_{1}H$	⟶	${}^{4}_{2}He$	+	${}^{12}_{6}C$			(transmutation)

♦ ${}^{12}_{6}C$ symbolise l'isotope 12 du carbone. Plus généralement, un isotope est caractérisé par deux nombres : son nombre de masse (indice supérieur) et son numéro atomique (indice inférieur).

Finalement, le carbone se trouve régénéré, et le résultat final est la fusion de 4 atomes d'hydrogène en un atome d'hélium.

L'énergie libérée correspond au défaut de masse ♦ et explique les hautes températures.

♦ Voir l'article : l'Atome, page 52.

CYCLOTRON (Cyclotron) pages 22, 205, 314, 324, 420, 508, 510.

Accélérateur circulaire de particules (protons et ions positifs), imaginé par Lawrence.

Une particule chargée, lancée horizontalement dans un champ magnétique vertical uniforme produit par un électro-aimant, décrit à vitesse constante une trajectoire circulaire.

Si la vitesse est v, m la masse de la particule, q sa charge et B l'intensité du champ magnétique, le rayon R de cette trajectoire est donné par la formule $R = \frac{mv}{Bq}$.

Calculons le temps T mis par une particule pour effectuer un cercle complet, soit une trajectoire de longueur $2\pi R$ à la vitesse v.

Donc :

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{v} \times \frac{m\,v}{B\,q} = \frac{2\pi}{B} \times \frac{m}{q}.$$

On peut remarquer que la vitesse n'intervient pas dans la formule, ce qui signifie que des particules identiques, lancées simultanément à des vitesses différentes, effectuent un tour complet pendant le même temps. Imaginons donc une « bouffée » de particules lancées dans le champ magnétique. Si on trouve le moyen de leur donner, à chaque demi-tour, une impulsion pendant un temps très court, grâce à une tension électrique V, leur vitesse augmentera de $\Delta v = qV$. La trajectoire sera un demi-cercle de rayon un peu plus grand que le demi-cercle précédent, et ainsi de suite, toutes les particules subissant la même accélération en même temps. On pourra ainsi donner aux particules, en plusieurs fois, la même vitesse que dans un accélérateur où l'on appliquerait en une seule fois une tension beaucoup plus élevée. C'est le principe du cyclotron.

Le cyclotron comprendra donc :

— un électro-aimant permettant de créer le champ magnétique ;

— dans l'entrefer ♦ de l'électro-aimant : une enceinte où l'on réalise le vide et contenant deux boîtes (*dees*) en forme de D où l'on introduit les particules à accélérer ;

— un générateur électrique qui produit une tension alternative dont la période est égale au temps que met une particule pour effectuer un tour. Ce générateur est, de surcroît, synchronisé avec l'émission de particules, de sorte que, à chaque passage d'un dee à l'autre, la particule est soumise à une tension accélératrice V (pendant que la particule effectue un demi-tour, V a changé de sens) ;

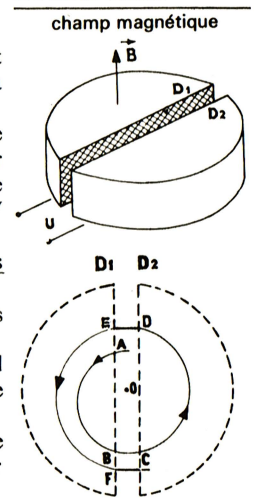
— un déflecteur, dirigeant les particules arrivant à la périphérie vers les cibles à étudier (figure ci-contre).

Le cyclotron permet de donner à des protons une énergie de l'ordre de 25 millions d'électrons-volts (25 M*e*V).

Son principe reposant sur la constance de la masse des particules accélérées, il ne peut être utilisé que dans les limites où la relativité n'intervient pas, c'est-à-dire tant que les vitesses restent faibles par rapport à la célérité de la lumière.

Les synchrocyclotrons, synchronisant la tension accélératrice sur le temps de parcours de la trajectoire, permettent de compenser l'effet de relativité et d'accélérer des protons jusqu'à une énergie de 500 M*e*V.

♦ Entrefer : espace compris entre les deux pôles de l'électro-aimant.



D_1, D_2 : dees ;
U : tension alternative du générateur ;
AB, CD, EF : arcs de cercle successifs de rayons croissants qui correspondent à la trajectoire d'une particule dans le cyclotron.

D

DATATION (Radiocarbon dating) page 91.

Détermination de l'âge d'une substance par des mesures de radioactivité. La méthode la plus répandue est celle qui fait appel au carbone 14. Le carbone 14 ($^{14}_{6}C$) est un isotope artificiel radioactif ♦ du carbone produit dans l'atmosphère par l'action des neutrons du rayonnement cosmique sur l'azote ($^{14}_{7}N$) :

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}H$$

azote neutron carbone 14 hydrogène

Ce carbone 14 est absorbé, comme le carbone « ordinaire » ^{12}C, par les organismes vivants sous forme de gaz carbonique CO_2. Il résulte que, la proportion de carbone 14 étant constante dans l'atmosphère, il en est de même dans l'organisme, tant qu'il est vivant.

Après la mort, les échanges avec l'atmosphère cessent et la proportion de carbone 14 décroît lentement (elle diminue de moitié en un peu moins de 6 000 ans). On peut donc, par mesure de la radioactivité, déterminer l'époque approximative où les échanges ont cessé : on pourra, par exemple, déterminer si les restes d'un peu de bois trouvé dans une grotte sont vieux de plusieurs millénaires ou d'un siècle seulement...

♦ Le carbone 14 subit la désintégration bêta :

$$^{14}_{6}C \longrightarrow \underset{\text{électron}}{^{0}_{-1}e^{-}} + ^{14}_{7}N + \nu$$

azote neutrino

Sa période radioactive est de 5 670 ans.

DAVISSON (Clinton Joseph) pages 87, 174.

Né à Bloomington en 1881, mort à Charlottesville en 1958, physicien américain, docteur de l'université de Princeton. En 1911, il est nommé chef de travaux à l'Institut de technologie de Pittsburg. Il entre en 1925 au laboratoire des téléphones Bell. Outre sa découverte de la diffraction des électrons en 1927, avec Germer ♦, il a étudié les radiations thermiques et l'optique électronique. Prix Nobel de physique en 1937 avec l'Anglais G.P. Thomson.

♦ Lester Halbert Germer, né à Chicago en 1896 : chercheur au laboratoire des téléphones Bell. Ses travaux ont porté sur l'émission thermoélectronique et l'optique ondulatoire. Il a réalisé avec Davisson l'expérience (1927) montrant la diffraction des électrons par les cristaux.

DAVISSON et GERMER (expérience de) pages 87, 171, 174.

Expérience, réalisée en 1927, qui confirme les hypothèses de L. de Broglie sur les ondes associées à des particules en mouvement : l'onde associée peut ainsi produire, comme une onde électromagnétique (lumière, rayons X), des phénomènes de diffraction. « En envoyant un faisceau d'électrons sur un cristal de nickel, ils ont observé un phénomène de diffraction qui s'explique entièrement en appliquant aux ondes associées aux électrons la théorie due à Laue de la diffusion des ondes par les cristaux. Naturellement, des apparences observées, on peut déduire la valeur de la longueur d'onde associée aux électrons, en bon accord avec la théorie. ♦ »

♦ L. de Broglie : *Ondes, corpuscules, mécanique ondulatoire* (Albin Michel, Paris, 1949).

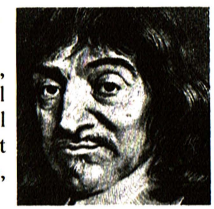
DÉCHETS RADIOACTIFS (Radioactive decays)

Produits extraits des réacteurs nucléaires, formés de résidus du combustible. Ces produits contiennent, outre des restes de la matière fissile proprement dite, des substances radioactives à faible période (dont l'activité décroît rapidement) et d'autres dont la période est plus élevée (par exemple, le strontium 90, dont la période est de 14 ans).
L'élimination de ces déchets pose un problème qui n'a pas encore reçu de solution satisfaisante. A l'heure actuelle, on procède soit à l'enfouissement, dans des zones désertiques, soit à l'immersion, dans des fosses marines, des déchets logés dans des containers étanches.

DESCARTES (loi de) : voir Réfraction et les pages 367, 368, 408, 417, 444, 481.

DESCARTES (René)

Philosophe et mathématicien français, né en Touraine en 1596, mort à Stockholm en 1650.
Esprit universel, Descartes excelle aussi bien dans le domaine de la philosophie, où il laisse une marque impérissable, que dans celui des mathématiques, où il jette les bases de la science moderne. Issu d'une famille de bourgeois aisés, il s'engage encore jeune dans plusieurs armées et parcourt ainsi l'Europe pendant vingt ans. Il se fixe ensuite en Hollande, d'où il effectue des séjours en France, au Danemark et en Suède où il meurt d'une pneumonie.
Dans le domaine des sciences, Descartes se penche très tôt sur les problèmes de la chute des corps et de la pression des liquides. Il énonce ensuite les premiers principes de la géométrie analytique et simplifie les notations algébriques. Vers 1626, il découvre la loi des sinus. Inventeur de quelques instruments d'optique, il énonce les lois fondamentales de la réflexion et de la réfraction. Incité à rechercher les fondements de la physique, il rédige un traité puis trois mémoires qui expliquent « les causes de tout ce qu'il y a de plus admirable sur la Terre » et qui, précédés d'une préface, paraissent en 1637 sous un titre célèbre, le « Discours de la méthode ». Répondant à de vives critiques, Descartes rédige alors deux courts écrits de statique où son expliqués des « engins » tels que la poulie, le plan incliné et la vis. En 1644, Descartes publie les « Principes de la philosophie » qui sont, en fait, ceux de la physique, dont il a déjà donné les applications. Il y énonce en particulier des propositions sur le mouvement et le choc et, le premier, formule la loi d'inertie ♦.


René Descartes (Viollet).

♦ R. Descartes : *Œuvres complètes* (Gallimard, Paris, 1966).

DÉSINTÉGRATION ♦ (Disintegration) pages 47, 61, 83, 98, 99, 167, 254, 256, 257, 317, 340, 413, 424, 427, 433, 434, 436, 439, 440, 445, 478, 490, 499, 503, 514.

♦ Se reporter à l'Atome, pages 57 à 94.

Phénomène au cours duquel un *noyau* ou une *particule élémentaire* subit une transformation de structure et produit un nombre de particules supérieur au nombre initial.
La désintégration spontanée d'un noyau, cas particulier de ce phénomène général, est la radioactivité.
La désintégration artificielle d'un noyau est provoquée par la collision d'une particule avec ce noyau. La fission d'un noyau d'uranium sous l'impact d'un neutron est un exemple de ce processus.
A l'exception du proton, de l'électron et de leurs antiparticules, ainsi que du photon qui échappe, conformément à la relativité, à la notion de temps, les

particules élémentaires se désintègrent plus ou moins rapidement. Par exemple, le neutron, dont la vie moyenne est de 1 000 secondes environ se désintègre conformément au schéma :

$$n \longrightarrow p + e^- + \nu$$

neutron donne proton + électron + neutrino

DÉTECTEURS : voir Compteurs et les pages 320, 440, 486, 499.

DÉTENTE (Expansion)

Transformation inverse d'une compression, c'est-à-dire passage d'un gaz à une pression plus faible que sa pression initiale. Comme pour les compressions, il y a une infinité de modes de détente, mais on peut les rattacher à deux types :

— *Détente isotherme* ♦. Le gaz suit sensiblement la loi de Mariotte. Si son volume initial est V et sa pression, P, la pression P′ et le volume V′ dans l'état final sont tels que : $PV = P'V'$.

♦ Isotherme : à température constante.

— *Détente adiabatique* ♦. La détente s'effectue suivant une loi qui s'exprime par $PV^\gamma = P'V'^\gamma$, qu'on appelle « loi de Laplace », γ étant un coefficient qui dépend de la nature du gaz ($\gamma = 1{,}4$ pour l'air).

♦ Adiabatique : sans échange de chaleur avec le milieu extérieur.

Cette détente s'accompagne d'un abaissement de la température du gaz. En opérant plusieurs détentes successives, on arrive à atteindre des températures suffisamment basses pour produire la liquéfaction du gaz. Cette technique est couramment utilisée.

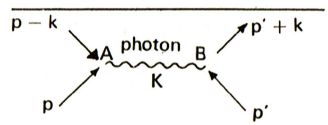
DIAGRAMME DE FEYNMAN (Feynman's diagram)

Diagramme imaginé par Feynman pour interpréter, par la théorie quantique des champs, l'interaction de deux particules.

Une particule agit sur une autre par l'intermédiaire du champ qu'elle crée. A ce champ correspond un photon virtuel, non observable, qui agit sur l'autre particule. Au cours de cette opération, l'impulsion des deux particules ou quantité de mouvement se trouve modifiée.

Sur le diagramme ci-contre, un électron A d'impulsion p émet un photon d'impulsion k qui se trouve transmise à l'électron B.

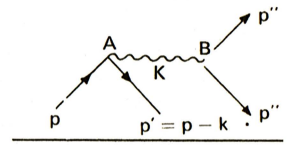
A la fin du processus, l'impulsion de A est $p - k$, celle de B est $p' + k$ (les flèches ne représentent pas les directions des électrons avant et après l'interaction : la mécanique quantique ne définit pas les trajectoires ; il s'agit d'une représentation purement conventionnelle).



A : électron d'impulsion p
B : électron d'impulsion p′

L'annihilation d'une particule par son antiparticule peut être représentée de façon analogue : un électron d'impulsion p rencontre un positron d'une impulsion $p' = p - k$.

Après l'annihilation, il ne reste plus qu'un photon qui transmet son impulsion k à la particule B d'impulsion initiale p''.



DIFFÉRENCE DE POTENTIEL : voir Potentiel et les pages 357, 358, 483, 486, 496.

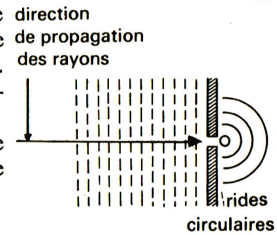
DIFFRACTION ♦ (Diffraction) pages 86, 151, 171, 203, 212, 273, 342, 358, 360, 383, 393, 408, 490, 491, 496, 505, 506, 507.

♦ Se reporter à l'Optique, pages 383 à 386.

Phénomène optique conduisant à recueillir de la lumière en dehors des zones prévues par le principe de la propagation rectiligne de la lumière, base de l'optique géométrique.

Si on considère la lumière comme une vibration, l'interprétation est évidente et résulte du principe de Huygens et Fresnel ♦ :
« Chaque point d'une surface d'onde (surface atteinte à l'instant t par la vibration lumineuse, partie de la source lumineuse à l'instant 0) joue le rôle de source secondaire et rayonne dans toutes les directions. » C'est ce qu'on observe lorsqu'une houle régulière vient battre une digue percée d'une étroite ouverture O. A l'intérieur de la digue se forment des vagues circulaires, centrées sur l'ouverture O. O joue le rôle de source secondaire.
De la même façon, on s'explique que la lumière d'un faisceau tombant sur une fente étroite soit reçue par diffraction, dans d'autres directions que celle de l'axe du faisceau, et ce d'autant plus que la fente est plus étroite.

♦ Voir l'article : l'Optique.



Domaines d'utilisation et limites de la diffraction

La diffraction a des conséquences importantes. Elle a permis à Fresnel de montrer le caractère vibratoire de la lumière. De plus, la diffraction, par une série de fentes ou de traits parallèles équidistants (réseau), conduit à une dispersion de la lumière blanche, donc à une technique de spectroscopie largement employée.
Elle intervient pour limiter les performances d'instruments tels que la lunette astronomique ou le microscope, mais elle en fournit également la solution : un objet ponctuel donnera, par diffraction, une tache centrale entourée d'anneaux, se substituant au point image prévu par l'optique géométrique. On montre que le rayon r de la tache centrale est donné par la formule :

$r = \dfrac{1{,}22\,\lambda}{2n \sin u}$, où λ est la longueur d'onde de la lumière utilisée,
n l'indice de réfraction du milieu,
u l'angle d'ouverture du faisceau formant la tache.

Deux objets seront « séparés », c'est-à-dire vus séparément, si la distance de leurs images (centre des taches de diffraction) est au moins égale à r. Cette distance est proportionnelle à la longueur d'onde λ de la radiation. Pour observer de plus petits détails, il nous faut diminuer λ, c'est-à-dire utiliser autre chose que la lumière visible.
C'est de là qu'est né le microscope électronique, où la radiation est l'onde d'accompagnement (onde de de Broglie) de l'électron, de l'ordre d'une fraction d'angström ♦.
Le microscope électronique permet des grossissements environ 1 000 fois plus grands que les grossissements obtenus avec un microscope ordinaire.

♦ 1 Å = 10^{-10} millimètre = 10^{-4} micron.

L'exemple précédent nous montre que la diffraction n'est pas propre à la lumière, mais à tout phénomène pouvant présenter un caractère ondulatoire, et l'expérience de Davisson et Germer (1927) montrant la diffraction électronique a été la première preuve expérimentale de la théorie de Louis de Broglie.
De même, la diffraction des rayons X sur le réseau formé par les atomes ou les ions d'un cristal a prouvé la nature ondulatoire de ces rayons. Diffraction par les rayons X et diffraction électronique sont utilisées maintenant, souvent ensemble, pour étudier la structure des cristaux.

DILATATION (Expansion) pages 281, 215, 264, 271, 494.

Augmentation, sous l'effet d'une élévation de température, de la longueur ou du volume d'un corps.
Un solide est caractérisé par son coefficient de dilatation linéaire ♦, λ, défini ainsi :

♦ Dilatation linéaire ou dilatation « en longueur » ; par exemple, l'allongement d'un fil métallique sous l'action de la chaleur.

si l'une des dimensions de ce solide est l_o à 0°C, et l à la température t°C, l'allongement (dilatation) $l - l_o$ est donné par :

$$l - l_o = \lambda l_o t \quad \text{ou} \quad \lambda = \frac{l - l_o}{l_o t}.$$

λ est généralement de l'ordre de 10^{-5} $\left(= \frac{1}{100\,000}\right)$.

Voici quelques valeurs de λ pour différents corps :

	fer	aluminium	cuivre	verre	platine
λ	$1{,}2 \,.\, 10^{-5}$	$2{,}3 \,.\, 10^{-5}$	$1{,}7 \,.\, 10^{-5}$	$0{,}9 \,.\, 10^{-5}$	$0{,}9 \,.\, 10^{-5}$

Un liquide ou un gaz est caractérisé par son coefficient de dilatation en volume a, défini de façon analogue : $a = \frac{V - V_o}{V_o t}$, si V_o et V sont les volumes, aux températures 0°C et t°C.

Pour les gaz, le coefficient de dilatation (à pression constante) est sensiblement le même pour tous ; il est égal à $\frac{1}{273}$ ♦.

♦ Voir Gaz parfait, Température.

Dilatation du temps

Une des conséquences de la relativité est que le temps n'est pas le même pour un observateur immobile par rapport à un repère donné et pour un mobile en translation à la vitesse v, par rapport à ce repère. Un intervalle de temps t (pour l'observateur) correspond à un intervalle t' dans le système en translation donné par la formule : $t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, où c est la célérité de la lumière.

Une vérification expérimentale a été faite sur des muons provenant du rayonnement cosmique : leur durée de vie aurait correspondu à un parcours d'environ 600 m dans l'atmosphère, alors que l'expérience montre un parcours moyen de plusieurs kilomètres. La différence entre ces deux résultats provient de ce que la durée de vie des muons doit être mesurée dans leur système propre et non en référence à un observateur terrestre.

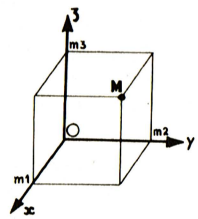
DIMENSION (Size, measurement)

Pour fixer la position d'un point dans l'espace, on repère sa position par rapport à un référentiel, ou système d'axes.

La géométrie classique ou euclidienne exige 3 axes, et la position du point M est définie par ses 3 coordonnées : $x = Om_1$ $\quad y = Om_2$ $\quad z = Om_3$ et

$$\overline{OM}^2 = x^2 + y^2 + z^2.$$

Nous dirons que l'espace euclidien est à 3 dimensions.



En relativité, on utilise l'espace-temps de Minkowski où l'on repère un point par 4 coordonnées :

— les trois coordonnées d'espace x, y, z ;

— la coordonnée de temps, évidemment non représentable sur une figure géométrique, égale à $i\,c\,t$, où $i = \sqrt{-1}$, c la célérité de la lumière.

La « distance » des deux points O de coordonnées ($x = 0$, $y = 0$, $z = 0$, $t = 0$) et M, défini par les quatre coordonnées (x, y, z, t) est égale à :

$$\overline{OM}^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2.$$

L'espace-temps de Minkowski est donc un espace à quatre dimensions.

DIODE ♦ (Diode) pages 159, 229 à 232, 236 à 238, 240, 242, 243, 273, 502, 521, 525, 539.

♦ Se reporter à l'Électronique, pages 229 à 232.

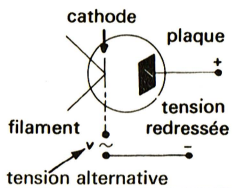
Dispositif assurant le redressement d'un courant alternatif, c'est-à-dire sa transformation en un courant de sens constant.

Diode à filament

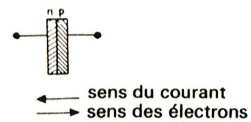
Tube électronique comprenant une cathode émissive ♦ chauffée par un filament et une plaque, dans une enceinte où l'on a fait le vide. Si on applique entre cathode et plaque une tension alternative, un courant ne s'établira dans le circuit que lorsque la plaque est positive par rapport à la cathode. Il en résultera dans le circuit un courant de sens constant, par suppression de l'alternance négative.

♦ Voir Effet thermoélectrique.

diode à filament



diode à cristal



Diode à cristal

Elle résulte des propriétés de la jonction d'un semi-conducteur à un métal ou à un semi-conducteur de type différent.
Un cristal de silicium ou de germanium, dopé d'impuretés ♦ lui donnant une conductivité du type *n* (par exemple), donc un excès d'électrons, laissera passer le courant dans le sens qui tend à évacuer cet excès. Associé à un semi-conducteur *p* (à trous positifs), le système ne laissera donc passer le courant que dans le sens conventionnel $p \longrightarrow n$. On a ainsi un redresseur peu fragile ; on peut grouper plusieurs centaines de redresseurs de ce type et redresser ainsi des courants considérables (locomotives électriques).

♦ Le semi-conducteur, dopé par des impuretés donnant des électrons supplémentaires, est dit du type *n* ; quand il est dopé par un défaut, c'est-à-dire quand, au lieu d'avoir un électron supplémentaire, c'est un trou qui existe et qui peut être remplacé par un électron voisin, le semi-conducteur est dit du type *p*.

DIRAC (Paul) pages 85, 103, 291, 294, 295, 306, 361, 413, 428, 429, 500, 508, 509, 515.

Physicien anglais, né à Bristol en 1902.
Après des études d'ingénieur en électricité puis de physique théorique, Dirac occupe une chaire de mathématiques à Cambridge et à Dublin. Membre de la Royal Society, il reçoit le prix Nobel de physique avec Schrödinger en 1933.
Parallèlement aux travaux de de Broglie, d'Heisenberg et de Schrödinger, Dirac développe une théorie mathématique de la mécanique quantique, énonçant une algèbre non commutative permettant de calculer des propriétés atomiques. Il donne une interprétation statistique de cette mécanique (la statistique Fermi-Dirac) et fait d'importants travaux sur la théorie quantique de la radiation.
Continuant, d'autre part, l'œuvre de Louis de Broglie sur les propriétés ondulatoires des particules, Dirac entreprend des recherches sur l'électron. En 1930, il émet l'hypothèse de l'existence d'antiparticules : particules d'une masse égale à celle de l'électron, mais de charge opposée. Cette théorie, d'abord fort contestée, est confirmée deux ans plus tard par la découverte du positron par Anderson. Enfin, c'est l'apport qu'il fait à la théorie du spin de l'électron qui vaut à Dirac le prix Nobel. Remplaçant l'équation ondulatoire au second degré de Schrödinger par un système de quatre équations du premier degré, il met en évidence diverses propriétés de l'électron, dont le spin et le moment magnétique anormal.

Ouvrages essentiels :
Les Principes de la mécanique quantique (P.U.F., Paris, 1931) ;
La Théorie de l'électron et du champ magnétique (Gauthier-Villars, Paris, 1939) ;
Quelques développements sur la théorie atomique (imp. Poulet-Malassis, Alençon, 1948) ;
La Seconde Quantification (Gauthier-Villars, Paris, 1949) ;
Les Transformations de jauge en électrodynamique (Gauthier-Villars, Paris, 1953).

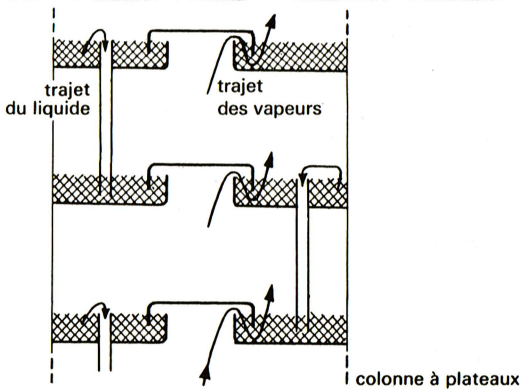
Paul Dirac (Viollet).

DISCONTINU (Discontinuous) pages 192, 196, 208, 231, 274, 290, 292, 329, 521.

Tout dans le monde est discontinu, pourrait-on dire. Tout, c'est-à-dire la matière et l'énergie.
La discontinuité de la matière, entrevue au XIXe siècle par les chimistes comme la cause des lois des combinaisons chimiques, est aujourd'hui acquise. L'atome lui-même se trouve ne plus être le constituant ultime, mais un assemblage de particules élémentaires, douées de masses bien définies et non infiniment petites.
La discontinuité de l'électricité résulte de l'existence de l'électron, mis en évidence par Jean Perrin. Toute charge électrique est un multiple de celle de l'électron ($1{,}6 \times 10^{-19}$ coulomb).
L'énergie est également discontinue, ou quantifiée : l'étude des raies spectrales de l'hydrogène et l'effet photoélectrique ont conduit à affirmer que l'énergie ne peut varier que par sauts discontinus d'un état à un autre. Toute variation d'énergie est un multiple d'une constante universelle, la constante de Planck : $h = 6{,}62 \,.\, 10^{-34}$ joule.
Cette découverte est l'une des plus importantes de la physique moderne et conduit à la physique quantique.
L'un des problèmes de la physique actuelle est de déterminer un éventuel quantum de longueur, dont toutes les longueurs devraient être des multiples entiers.

DISTILLATION (Distillation, retorting) pages 108, 181, 314, 488.

Opération consistant en une vaporisation suivie d'une condensation. Lorsque la distillation s'effectue sur un mélange de deux liquides, le plus volatil se retrouve en plus forte proportion dans les vapeurs émises que dans le liquide. On peut ainsi séparer deux liquides, dont les températures d'ébullition sont sensiblement différentes.
La distillation simple est celle qui comprend une seule opération du type précédent. Elle ne peut permettre en général de séparer complètement deux corps purs. On opère alors une distillation fractionnée : pour cela, l'industrie utilise des colonnes à plateaux. Les vapeurs, barbotant dans le liquide garnissant chaque plateau, le réchauffent en se refroidissant elles-mêmes. Ainsi elles vaporisent une partie du constituant le plus volatil de ce liquide, qui va gagner le plateau suivant. En même temps, elles abandonnent, en partie, leur constituant le moins volatil. Il en résulte que, en fonctionnement permanent, la composition



du liquide garnissant un plateau est constante, ainsi que la température de ce plateau.
On peut ainsi prélever soit un corps pur, en tête de colonne, soit un mélange de composition constante. C'est ainsi qu'on extrait du pétrole brut les mélanges tels que l'essence ou le fuel.

DOMAINE (Domain) : voir Électricité et magnétisme page 202 et Ferrimagnétisme.

DOPAGE ♦ pages 176, 237, 273, 452, 521.

♦ Pour plus de précisions, lire le Cristal, pages 158 et 159, et l'Électronique, page 237.

Opération consistant à ajouter à un semi-conducteur un élément étranger dans une proportion de 1 pour 10 000 ou moins ; par exemple, de l'arsenic ou du germanium. On obtient ainsi un semi-conducteur « extrinsèque », où la conduction est due en grande partie à l'impureté dont la structure électronique est différente de celle de l'élément primitif. Le dopage par l'arsenic donne une conduction par excès d'électrons (type *n*), le dopage par l'indium produit un défaut d'électrons et une conduction par « trous positifs » (type *p*).

DOPPLER (Christian)

Mathématicien et physicien autrichien, né à Salzbourg en 1803, mort à Venise en 1863.
Professeur de mathématiques et de physique expérimentale, directeur de l'Institut de physique de Vienne, Doppler a laissé son nom à un célèbre principe. En 1842, il énonce une théorie mathématique permettant de calculer la variation de tonalité du son selon les déplacements de la source. Ayant remarqué que les variations de fréquence d'une vibration sont dues aux mouvements relatifs de l'observateur et de la source, il en tire une analogie avec la lumière des étoiles : la couleur de la lumière provenant d'une étoile doit varier de la même façon que la tonalité du son provenant d'une source en mouvement.
La théorie du son sera vérifiée de façon assez pittoresque deux ans plus tard : pendant deux jours, une locomotive tire de long en large un wagon à différentes vitesses. Sur ce wagon, des trompettistes jouent une note donnée. A terre, des musiciens reprennent la note à mesure que le train s'approche ou s'éloigne. Les équations de Doppler s'avèrent alors justes.
Quant à la théorie de la lumière, reprise et mise au point quelques années plus tard par Fizeau, elle est la première base de la conception de l'univers en expansion.

Ouvrages essentiels :
Versuch einer analytischen Behandlung beliebig begrenzter und zusammengeztzter Linien, Flächen und Körper, nebst einer Anwendung davon auf verschiedene Probleme der Geometrie descriptive und Perspective (G. Haase, Söhne, Prague, 1839).

DOPPLER (effet) (Doppler effect)

L'effet Doppler est responsable de la variation de hauteur, donc de fréquence, d'un son émis par une source en mouvement par rapport à un observateur : nous avons tous remarqué cette variation de la hauteur du son sur le quai d'une gare lorsque siffle une locomotive passant à vive allure.
Dans le cas d'un observateur et d'une source en mouvement, si l'on compte positivement toutes les vitesses (V, v_o, v_s) dans le sens de propagation de la

fig. 1

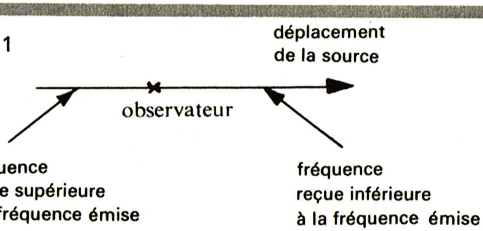
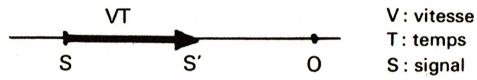


fig. 2



vibration, la fréquence reçue N′ est donnée en fonction de N, fréquence émise, par la formule :

$$N' = \frac{V - v_o}{V - v_s} N,$$

où V est la célérité de la vibration, v_0 la vitesse de l'observateur, v_s celle de la source (fig. 1).

Dans le cas d'un observateur immobile, la source se déplaçant vers l'observateur O, chaque vibration, émise à intervalles réguliers T par la source, se propage vers l'observateur à la vitesse V, la source se déplaçant à la vitesse v_s.

Au temps t_0, la source (en S) émet un signal qui parvient à l'observateur au temps $t = \frac{SO}{V}$ (fig. 2).

Le signal suivant est émis au temps T ♦. Pendant ce temps T, S aura parcouru $SS' = v_s T$, et sera en S′. Ce signal parviendra en O au temps $t' = \frac{S'O}{V} + T$.

♦ T correspond à la période des vibrations de la source, inverse de la fréquence.

La perception de 2 signaux consécutifs, séparés à l'émission par le temps T, sera, pour l'observateur, séparée par un temps $T' = t' - t$, soit :

$$T' = T - \frac{S'O - SO}{V}.$$

Or, $S'O - SO = SS' = v_s T$, donc $T' = T - \frac{T v_s}{V}$; $T' = T\left(1 - \frac{v_s}{V}\right)$.

Ou, puisque T et T′ sont les périodes vraie et apparente de la vibration, $\frac{1}{T'} = \frac{1}{T}\frac{V}{V - v_s}$, ou $N' = N\frac{V}{V - v_s}$, N et N′ étant cette fois les fréquences vraie et apparente.

On établit donc la formule $N' = \frac{V - v_o}{V - v_s}$ dans le cas où $v_o = 0$.

L'effet Doppler se produit avec toutes les vibrations et, en particulier, les vibrations électromagnétiques (ondes hertziennes ou lumière). Ainsi, la couleur de la lumière reçue d'un astre dépend de la vitesse relative de l'astre par rapport à l'observateur.

DYNAMIQUE (Dynamics) pages 183, 208, 217, 224, 270, 309, 332, 338, 494, 495.

Branche de la mécanique étudiant les forces et leurs effets sur le mouvement d'un corps matériel.

La dynamique classique (non relativiste) est basée sur le principe fondamental de la proportionnalité des forces et des accélérations, cette proportionnalité

s'exprimant par la relation : $\vec{f} = m\vec{\gamma}$, où f représente la force, m, la masse du corps auquel on applique $\vec{f}$, et $\vec{\gamma}$ l'accélération.
La masse m (ou, plus précisément, la masse d'inertie) est une constante caractéristique du corps auquel on applique la force.
Il n'en est plus de même en dynamique relativiste, où la masse est elle-même fonction de la vitesse, suivant la formule :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

où m est la masse à la vitesse v, m_0 la masse au repos, c la célérité de la lumière dans le vide.

DYNAMO pages 145, 189, 192, 257, 273, 274, 308, 348, 358, 536.

Abréviation de « machine dynamoélectrique ». Dans son état actuel, c'est une descendante de la machine de Zénobe Gramme (1871), mais il faut mentionner, entre autres, les machines de Pacinotti ♦, en Italie, et de Siemens ♦, en Allemagne, qui lui ouvriront la voie.

Principe

Un cadre tournant dans un champ magnétique uniforme B fournit une force électromotrice alternative, qu'on peut recueillir, grâce à deux bagues C_1 et C_2. C'est le principe d'un alternateur, en fait assez peu utilisé.
Mais, si on utilise non plus deux bagues, mais deux demi-bagues (fig. 1), on inverse les contacts à chaque demi-tour, et on obtient une force électromotrice variable, mais de sens constant (fig. 2). C'est une dynamo rudimentaire.
Avec deux cadres perpendiculaires, reliés à des quarts de bagues, chaque cadre est relié à C_1 et C_2, de quart de tour en quart de tour. On obtient une force électromotrice moins ondulée.
Il suffit maintenant d'avoir un plus grand nombre de cadres, et le nombre correspondant de contacts, pour obtenir un courant sensiblement continu.

Constituants d'une dynamo

Pratiquement, une dynamo comprend (fig. 3) :
— un électro-aimant E, produisant le champ magnétique nécessaire ;
— un induit tournant, carcasse métallique sur laquelle sont bobinés des enroulements jouant le rôle des cadres envisagés plus haut, et reliés à un collecteur formé de lames de cuivre séparées par un isolant.
Les balais B_1 et B_2 frottant sur le collecteur sont reliés à l'utilisation.

La dynamo est un appareil compliqué, en raison des contacts tournants. On produit plutôt des forces électromotrices alternatives, qu'on redresse par des dispositifs à semi-conducteurs. Mais son intérêt est d'être réversible et de rester à la base de tous les moteurs à courant continu (moteurs de traction).

♦ Antonio Pacinotti (1841-1912), physicien italien. Ingénieur puis professeur aux universités de Bologne, puis de Cagliari et, enfin, de Pise. Il eut, cinq ans avant Gramme, l'idée de la dynamo et aussi de l'emploi de celle-ci comme moteur.

♦ Werner Siemens (1816-1892). Officier de l'armée prussienne, puis fondateur, en 1847, de la société Siemens-Halske pour l'installation de lignes télégraphiques. En 1866, il donne le principe d'une dynamo. Il installe de nombreuses lignes télégraphiques entre l'Europe et l'Inde et des câbles transatlantiques. Il a réalisé la première locomotive électrique (1879).

fig. 1

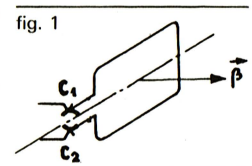
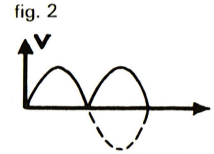


fig. 2



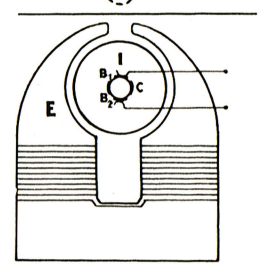


fig. 3

E

EAU LOURDE ♦ (Heavy water) pages 73, 74, 314, 344, 351, 454, 492.

Eau formée par combinaison d'atomes d'hydrogène lourd (ou deutérium♦, de masse atomique 2) avec l'oxygène.
Elle a des propriétés physiques sensiblement différentes de l'eau ordinaire (qui contient 1/20 000 d'eau lourde).

	eau	eau lourde
point de fusion	0°C	3,82°C
ébullition (à la pression atmosphérique)	100°C	101,42°C
masse volumique à 20°C	0,999826 g/cm³	1,1056 g/cm³

L'électrolyse de l'eau naturelle l'enrichit en eau lourde. C'est à partir de ce mélange enrichi, auquel on fait subir une distillation, qu'on obtient l'eau lourde utilisée dans les réacteurs.
L'importance de l'eau lourde en industrie nucléaire vient de son pouvoir modérateur, ralentissant les neutrons émis par la matière fissile et les rendant efficaces (l'eau ordinaire peut être utilisée, mais au prix d'une absorption beaucoup plus grande des neutrons).

♦ Se reporter à l'article : l'Atome, pages 73 et 74, et à Réacteur nucléaire.

♦ Voir Isotope.

ÉBULLITION (Ebullition) pages 167, 181, 329, 532.

Cas particulier de la vaporisation d'un liquide. Lors de l'ébullition, cette vaporisation se produit au sein même du liquide, d'où la formation de bulles, qui donnent son nom au phénomène.
La température d'ébullition d'un corps pur dépend de la pression qui règne au-dessus du liquide et reste constante pendant toute la durée de l'ébullition. On définit des températures d'ébullition normales, c'est-à-dire pour la pression de 1 atmosphère (ou 76 cm de mercure). En voici quelques exemples :

hélium	— 269°C	alcool	78°C
hydrogène	— 253°C	eau	100°C (par définition)
azote	— 195°C	mercure	357°C
oxygène	— 181°C	soufre	444°C
éther	35°C	zinc	920°C

ÉDIFICES IONIQUES (Ionic structures)

Cristaux constitués par un assemblage d'ions. L'édifice cristallin des sels est un édifice ionique. Les métaux forment également des édifices ioniques.

EDISON (Thomas) pages 192, 342, 515, 517.

Inventeur américain, né à Milan (Ohio) en 1847, mort à West Orange (New Jersey) en 1931.

Enfant passionnément curieux, Edison quitte l'école primaire trois mois après y être entré et monte un petit laboratoire d'expériences dans un grenier. Vendeur de journaux à douze ans, télégraphiste à seize, il parcourt les États-Unis, lisant, étudiant et questionnant avec passion et avidité. Il crée à New York le premier bureau d'ingénieurs-conseil et se lance dans les affaires à vingt-trois ans. Toute sa vie est dès lors consacrée à inventer, réparer, mettre au point.

Les plus célèbres inventions d'Edison sont le microphone ♦ à granules de charbon — qui fait faire d'énormes progrès au téléphone —, le phonographe et la lampe à incandescence. Toutefois, c'est par centaines que se chiffrent les découvertes de cet inventeur (un enregistreur électrique de bulletins de vote, un dictaphone, une batterie d'accumulateurs avec une solution alcaline et de l'oxyde de fer, etc.).

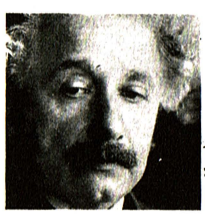
♦ Voir ce mot.

C'est en mettant au point sa lampe qu'Edison fit sa plus grande découverte scientifique, découverte qui porte d'ailleurs son nom : le passage de l'électricité d'un filament à une plaque de métal à l'intérieur d'une lampe à incandescence. Toutefois, il ne vit pas lui-même l'utilité immédiate de sa découverte et il reviendra à J. J. Thompson et à Fleming de la mettre au point. De là naîtra l'électronique.

Ouvrage essentiel :
Mémoires et observations (Flammarion, Paris, 1949).

EINSTEIN (Albert) pages 34, 35, 37, 85, 87, 101, 142, 143, 194, 199, 205, 218, 252, 274, 278 à 288, 301, 330, 331, 332, 337, 338, 358, 361, 413, 417, 423, 455, 494, 495, 508, 509, 514, 515, 518, 534.

Physicien allemand, naturalisé suisse puis américain, né à Ulm en 1879 et mort à Princeton (États-Unis) en 1955.


Albert Einstein (Viollet)

Avide de connaissances en mathématiques et en physique dès son plus jeune âge, mais assez peu porté vers les études scolaires, Einstein s'instruit surtout par des lectures personnelles. Venu assez jeune en Suisse, diplômé de l'École polytechnique de Zurich, successivement employé dans un bureau des brevets et professeur à l'université de Zurich, il retourne dans son pays natal en 1913, cumulant les fonctions de professeur à l'université de Berlin, de directeur du Kaiser Wilhelm Institute et de membre de l'Académie prussienne des sciences. Prix Nobel de physique en 1921, sa renommée est bientôt mondiale. Voyant la montée de Hitler au pouvoir, Einstein émigre en 1933 aux États-Unis et s'installe définitivement à l'Institut de Princeton.

En 1905, Einstein publie quatre ouvrages qui le mettent d'emblée au rang des plus grands savants du siècle. Le premier, appliquant à la lumière la théorie des quanta de Max Planck, expose l'hypothèse quantique de la lumière et l'effet photoélectrique. Le deuxième démontre que le mouvement brownien est une vérification observable de la théorie moléculaire de la matière. Le troisième établit le principe de l'équivalence entre l'énergie et la masse ♦. Le dernier, enfin, contient la théorie de la relativité restreinte, dont les implications vont bouleverser la physique traditionnelle. A vingt-six ans, Einstein apparaît ainsi comme un génie de la physique théorique, révolutionnant les conceptions bien établies de la distance et du temps.

♦ Voir Einstein (Relation d').

Ses efforts se portent alors sur le principe de la gravitation et sur ses rapports avec la théorie de la relativité. En 1916, il publie son œuvre fondamentale : la théorie de la relativité généralisée, probablement l'une des plus grandes découvertes de l'humanité.

Le thème dominant de l'œuvre postérieure d'Einstein est la recherche d'une théorie du champ unitaire qui réunirait les théories de l'électromagnétisme et de la gravitation en un système unique. Il contribue, par ailleurs, à éclaircir les problèmes posés par la théorie de la lumière et par la mécanique statistique.
L'influence de l'œuvre d'Einstein débordera largement les cadres de la physique et aura des retentissements en astronomie, en mathématiques et en philosophie.

Einstein sut concilier génie et générosité, menant une vie privée simple, partagée entre la musique et les plaisirs de la voile ; il ne professa d'autre religion qu'une ferme croyance en l'ordre de l'univers ; pacifiste, il fut toujours prêt à venir en aide aux individus ou groupes persécutés. Sa dernière apparition publique fut un appel pour la fin de la course aux armements nucléaires.

Ouvrages essentiels :

Déduction thermodynamique de la loi d'équivalence photochimique (imp. de Deslis, Tours, 1913) ;
Les Fondements de la théorie de la relativité générale (Hermann, Paris, 1933) ;
La Géométrie et l'Expérience (Gauthier-Villars, Paris, 1934) ;
Sur le problème cosmologique — Théorie de la gravitation générale (Gauthier-Villars, Paris, 1951) ;
Sur l'électrodynamique des corps en mouvement (Gauthier-Villars, Paris, 1955) ;
Lettres à Maurice Solovine (Gauthier-Villars, Paris, 1951) ;
Comment je vois le monde (Flammarion, Paris, 1963) ;
La Théorie de la relativité restreinte et généralisée (Gauthier-Villars, Paris, 1964) ;
L'Éther et la théorie de la relativité (Gauthier-Villars, Paris, 1964) ;
L'Évolution des idées en physique (Flammarion, Paris, 1964).

EINSTEIN (Relation d') (Einstein's relation)

Beaucoup d'équations mériteraient de s'appeler ainsi, car l'activité d'Einstein a été prodigieuse.
La plus célèbre parmi ces équations est celle qui exprime, comme conséquence de la théorie de la relativité, l'équivalence entre masse et énergie. Toute masse m (mesurée au repos) est équivalente à une énergie W donnée par la formule : $W = mc^2$, où c est la célérité de la lumière ou, plus généralement, la vitesse de propagation de l'énergie dans le vide.

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

voir l'article pages suivantes et les pages 124, 145, 176, 177, 182, 205, 207, 208, 250, 257, 263, 266, 267, 273, 277, 309, 313, 316, 317, 325, 328, 330, 338, 340, 345, 355, 410, 421, 423, 447, 452, 483, 489, 491, 492, 496, 515, 518, 535, 537.

Le mot «électricité» n'a plus grand sens en physique moderne. Il a du moins le mérite de rappeler l'étymologie grecque (« elecktron » = ambre) et l'origine du phénomène que l'on appelait électrisation : frottement d'un bâton d'ambre avec une peau de chat, ce qui rend l'ambre capable d'attirer des objets légers (papier, paille, etc.).
On a pu ainsi parler d'électricité statique et des deux sortes d'électricité, positive et négative, puis d'électricité dynamique, qui est l'étude des courants électriques.
En fait, on peut grouper sous le nom très général d'électricité non seulement l'électrostatique et l'électrocinétique, mais l'électronique et l'électromagnétisme, c'est-à-dire les propriétés magnétiques des champs en mouvement.

Électricité et magnétisme

par Roland Guillemard
et Renée Bense

Les Grecs anciens avaient été intrigués par deux phénomènes bien mystérieux : l'ambre ♦, frottée par un chiffon de laine, devenait capable d'attirer des objets légers, tels que des brins de paille. La pierre d'aimant ♦ attirait, de même, de menus morceaux de fer. Thalès de Milet (600 av. J.-C.), le fameux géomètre, avait fourni une explication : l'ambre et la pierre d'aimant avaient une âme, capable d'aspirer les corps voisins ♦. Il ne reste plus grand-chose de cette explication, mais il nous reste l'étymologie : en grec, ambre se dit « elektron », et ce mot nous a donné « électricité », comme « magnès », qui désignait la pierre d'aimant, nous a donné « magnétisme ».

♦ Sorte de résine fossile qu'on trouve en Asie Mineure.

♦ Oxyde de fer Fe_3O_4.

♦ D'après Edward T. Canby : *Histoire de l'électricité* (Rencontre, Lausanne, 1964).

Il faudra sauter environ vingt-quatre siècles pour retrouver l'unité de ces deux phénomènes, pressentie par Thalès, et un siècle de plus pour justifier cette identité. En effet, c'est à la fin du XVIIe siècle et au XVIIIe siècle que la curiosité scientifique l'emporte sur la crainte provoquée par les manifestations spectaculaires de la foudre et que l'on s'intéresse à nouveau à l'ambre et à l'aimant.

A cette époque, de nombreux expérimentateurs rivalisent d'ingéniosité pour produire et étudier cette mystérieuse électricité.

Mais le stade de la physique de salon, purement qualitative, est rapidement dépassé...

Charges électriques et masses magnétiques

En 1687, Newton avait énoncé la loi de gravitation universelle, selon laquelle deux corps s'attirent proportionnellement à l'inverse du carré de leur distance, ce qui se traduit par la formule :

$f = G\dfrac{mm'}{r^2}$, où G est la constante d'attraction, m et m' les masses des corps et r leur distance ♦.

♦ Rappelons que, dans le système international d'unités, $G = 6{,}67.10^{-11}$, les forces f étant exprimées en newtons, les masses m en kilogrammes et les distances r en mètres.

Assez naturellement, on chercha à traduire les forces électriques par une loi de même forme. On se rendit compte rapidement qu'il n'existait que deux sortes d'« électricité » : l'électricité « vitreuse », produite lorsqu'on frotte une baguette de verre avec de la laine, et l'électricité « résineuse », celle de l'ambre frotté par une peau de chat, et que deux corps chargés d'électricité de même nature se repoussaient, alors qu'ils s'attiraient s'ils étaient chargés d'électricité de nature différente.

Coulomb traduit l'électricité par une grandeur physique : la charge

Reste à traduire par une grandeur physique cette insaisissable électricité. C'est ce que fait Coulomb. Il pose — c'est assez logique — que deux corps qui sont attirés — ou repoussés — avec la même force, lorsqu'ils sont à la même distance d'un même corps électrisé, ont la même charge électrique. Et la charge, ainsi définie, peut dès lors être mesurée par les forces qui en résultent. Enfin, en 1785, Coulomb montre que les actions entre charges électriques obéissent à une loi newtonienne :

Les forces s'exerçant entre 2 charges q *et* q' *à la distance* r *sont données par :*

$$f = k\,\frac{qq'}{r^2}.$$

k est, dans cette formule, une constante caractérisant la force électrique, comme G la force de gravitation.
Dans le système international, $k = 9.10^9$, avec f en newtons, r en mètres, q et q' en coulombs.
La seule différence entre la loi de Coulomb et la loi de Newton est que q et q' peuvent être positives ou négatives : on donne *arbitrairement* le signe « + » aux charges « vitreuses » et le signe « — » aux charges « résineuses » (par la suite, ce choix se révélera malheureux, mais sera conservé).
La nature des charges ne sera élucidée que 100 ans plus tard, mais Franklin émettra la première hypothèse d'un fluide électrique unique, l'électricité négative étant pour lui un manque d'électricité positive ♦.

♦ L'avenir montrera que, en réalité, c'est le contraire : la charge positive est un manque de charge négative (ce qui est une conséquence du choix primitif du signe des charges).

Existe-t-il des masses magnétiques ?

A cette même époque, le magnétisme était encore plus mystérieux que l'électricité. Procédant par analogie avec les fluides électriques, Coulomb émit l'hypothèse de l'existence de deux fluides magnétiques, nord et sud. Les masses magnétiques, concentration de ces fluides opposés aux extrémités d'un aimant, lui donnaient ses propriétés. Les mesures de Coulomb ont montré que ces « masses magnétiques » localisées aux extrémités des aimants s'attiraient ou se repoussaient selon une loi newtonienne.
Un tel résultat, satisfaisant pour l'esprit, ne résolvait pas tout : charges positives et négatives ont une existence indépendante. Au contraire, lorsqu'on brise un aimant, on constitue deux aimants,

ayant chacun un pôle nord et un pôle sud, au lieu de séparer les masses magnétiques nord et sud des deux demi-aimants.
Il faut se rendre à l'évidence : si les masses magnétiques représentent un artifice de calcul commode, elles n'ont aucune existence réelle.

LE COURANT ÉLECTRIQUE

En 1798, Alessandro Volta, professeur à l'université de Pavie, invente la première *pile*, c'est-à-dire le premier générateur capable de fournir de façon continue le « fluide » électrique. Cette découverte marque une étape considérable, car c'est le début d'une nouvelle science : l'électrocinétique, étude des charges en mouvement, alors que le XVIIIe siècle avait fait les beaux jours de l'électrostatique, étude des charges en équilibre.

L'identité des charges électrostatiques et celles produites par la pile de Volta fut rapidement montrée — ce fut l'œuvre de Faraday — par les effets analogues qu'elles produisaient. On s'était d'abord rendu compte que tous les corps n'étaient pas capables, comme l'ambre, de s'« électriser ». Et, lors de l'apparition du courant électrique, on constata que ces « électriques ♦ » s'opposaient au passage du courant ; les autres corps, comme les métaux, incapables de s'électriser, permettaient au contraire la conduction du courant, comme ils transmettaient déjà à distance les décharges d'une bouteille de Leyde ♦ Ainsi se trouvait établie la distinction entre « isolants » et « conducteurs ».

♦ Ainsi appelait-on à l'époque les corps capables de s'électriser.

♦ Voir Pile.

La première moitié du XIXe siècle voit l'établissement des lois du courant électrique, c'est-à-dire du mouvement des charges.
Ainsi apparaissent :
— *les lois de Faraday*, régissant l'électrolyse. Ce phénomène de décomposition d'un corps sous l'action du courant électrique avait permis à Davy ♦ de découvrir le sodium, le potassium, le calcium, le magnésium, avant même que Faraday établisse les lois du phénomène ;
— *la loi de Joule*, sur l'échauffement produit par le passage du courant dans un conducteur ;
— *les lois d'Ohm et de Kirchhoff*, étudiant la répartition dans les circuits électriques de l'énergie produite par le générateur. En même temps, Gauss et Weber établissaient un système d'unités ♦ cohérentes permettant la mesure des grandeurs électriques qui venaient d'apparaître : quantité d'électricité, intensité, tension, force électromotrice, résistance.
Avant d'aller plus loin, intéressons-nous un peu à la traduction mathématique de l'électricité.

♦ Sir Humphrey Davy : chimiste et physicien anglais, né à Penzance en 1778, mort en 1829, Il a découvert l'arc électrique, les métaux alcalins et inventé la lampe de sûreté des mineurs.

♦ Voir Unités.

LE CHAMP ÉLECTRIQUE

La loi de Coulomb, que nous avons déjà rencontrée et écrite sous la forme $f = k\,\frac{qq'}{r^2}$, donne l'intensité de la force qui s'exerce entre deux charges q et q'. Il est possible de lui donner une expression vectorielle ♦ lui permettant de caractériser complètement cette forme. Si $\vec{F}$ est la force que q exerce sur q' et si nous posons $\overrightarrow{AA'} = \vec{r}$, $\vec{r}$ étant un vecteur de longueur r, orienté de A vers A', la loi de Coulomb s'écrit :

$$\vec{F} = k\,\frac{qq'}{r^3}\,\vec{r}\,.$$

Cette formule montre que la force est dirigée suivant AA' dans le sens qui va de A vers A', si q et q' sont de même signe, ce qui correspond à une répulsion, et dans le sens A' vers A si q et q' sont de signe contraire, ce qui correspond à une attraction. La constante k vaut, nous l'avons déjà dit, 9.10^9 lorsqu'on utilise le système international pour étudier l'action de charges placées dans le vide ou dans l'air (avec une bonne approximation).

On a l'habitude de poser : $k = 9.10^9 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ ♦.

La loi de Coulomb :

$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,qq'\,\frac{\vec{r}}{r^3}$ apparaît comme un produit de facteurs caractérisant :

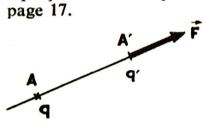
— le milieu : $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$, dans le vide;
— la charge subissant la force : q' (charge passive) ;
— la charge produisant la force : q (charge active) ;
— la distance entre les 2 charges : r.

On peut grouper tous les termes autres que la charge passive q' et écrire :

$$\vec{F} = \left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,q\,\frac{\vec{r}}{r^3}\right).\,q' = q'\,\vec{E}, \text{ avec } \vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,q\,\frac{\vec{r}}{r^3}.$$

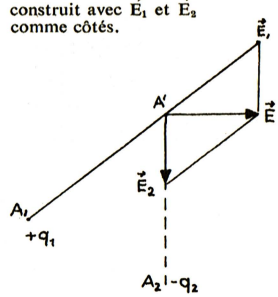
Le vecteur $\vec{E}$ ainsi défini caractérise, en somme, les propriétés que la présence de la charge q donne à l'espace qui l'entoure et exprime que toute charge placée dans le « champ d'action » de q sera soumise à une force. C'est le *vecteur champ électrique*, dont l'intensité se mesure, dans le système international, en volts par mètre ♦.

♦ Voir Aperçu mathématique page 17.



♦ ε_0 étant ce qu'on appelle la « permittivité » du vide (nous devons accepter cette définition). Quant au coefficient 4π, son intervention mystérieuse n'a d'autre but que de simplifier (ou « rationaliser ») certaines formules couramment utilisées.

♦ Cette définition peut être étendue à un système de charges, chaque charge créant en un point un champ, dont les effets s'ajoutent à ceux des autres charges, conformément à la règle du parallélogramme, selon laquelle la somme des deux vecteurs $\vec{E_1}$ et $\vec{E_2}$ concourant en A' est le vecteur représenté par la diagonale, issue de A', du parallélogramme construit avec $\vec{E_1}$ et $\vec{E_2}$ comme côtés.



PROPRIÉTÉS DU CHAMP ÉLECTRIQUE

Le champ électrique « dérive d'un potentiel »

Pour déplacer une charge soumise à un champ électrique, d'un point A à un point B, il faut fournir un certain travail (comme pour déplacer un poids dans le champ de pesanteur terrestre). Dire que le champ dérive d'un potentiel, c'est dire que ce travail ne dépend — pour une charge Q donnée — que des points A et B, et non du trajet suivi entre A et B. En d'autres termes, on peut associer aux points A et B les valeurs V_A et V_B d'une certaine fonction, la *fonction potentiel*, telle que le travail W de déplacement de la charge Q soit donné par : $W = Q\,(V_A - V_B)$.

Remarquons que, de même que 6 — 2 font 4 aussi bien que 7 — 3, on peut trouver plusieurs fonctions V dont la différence $V_A - V_B$ répond à la condition cherchée : on ne connaît sans ambiguïté que les *différences de potentiel* ($V_A - V_B$). La fonction V elle-même n'est définie qu'« à une constante près ». Sa définition complète exige un choix arbitraire. On pose en général V = 0 loin de toute charge, c'est-à-dire... à l'infini.

◆ Voir Aperçu mathématique, page 18.

Cette propriété du champ électrique s'exprime mathématiquement par deux propositions équivalentes :

— le champ électrique est le gradient ◆ du potentiel changé de signe : $\vec{E} = -\overrightarrow{grad}\, V$;

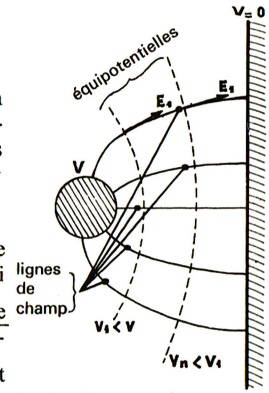
◆ Voir Aperçu mathématique, page 19.

— le rotationnel ◆ du champ électrique est nul : $\overrightarrow{rot}\, \vec{E} = 0$.

◆ L'unité de potentiel (ou de différence de potentiel) est le volt, et, par conséquent, le champ s'exprimera en volts par mètre.

La notion de potentiel est très importante. Pour mettre des charges en mouvement, il faut qu'elles soient placées dans un champ, et elles « circuleront » dans ce champ — si les charges sont positives — des potentiels élevés vers les potentiels faibles. Un « courant » ne pourra donc s'établir que s'il existe une différence de potentiel ◆.

Matérialisation des champs électriques : pour se faire une idée concrète du champ électrique, on peut le représenter par des lignes de champ qui sont en tout point tangentes au vecteur $\vec{E}$. La figure dessinée est le spectre électrique. On peut adjoindre aux lignes de champ des surfaces équipotentielles : le vecteur $\vec{E}$ est dirigé vers les potentiels décroissants et il est perpendiculaire aux surfaces équipotentielles.



V, V_1, V_2 : potentiels.

Flux du vecteur champ électrique $\vec{E}$

Commençons par une comparaison. Soit un courant d'eau, coulant à la vitesse v. La quantité d'eau passant à travers une boucle limitant une surface S (imaginons une épuisette plongée dans le courant...) dépend de S, de v, mais aussi de l'orientation de S par rapport au courant, définie par l'angle α de $\vec{n}$, perpendiculaire au plan de S, avec $\vec{v}$.

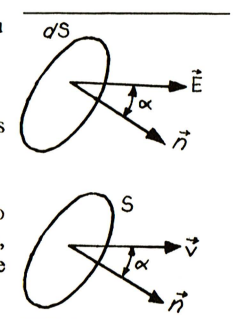
On peut définir le flux du courant Φ (c'est effectivement le volume d'eau qui traverse S pendant l'unité de temps) par la quantité :

$\Phi = S.\, v \cos \alpha$, ou par le produit scalaire ◆ : $\Phi = S\, \vec{n} . \vec{v}$.

De même, nous appellerons flux du vecteur champ électrique $\vec{E}$ à travers une surface infiniment petite dS la quantité :

$d\Phi = \vec{E} . \vec{n} . dS$ ou $d\Phi = E.\, dS. \cos \alpha$.

Pour calculer le flux total Φ à travers une surface S, il faut « intégrer » les flux élémentaires au travers de chaque élément dS de cette surface, c'est-à-dire faire la somme de tous ces flux élémentaires, ce qui se symbolise par : $\Phi = \iint_S \vec{E} . \vec{n} . dS$.



◆ Un cube, une sphère, une boîte ou toute surface isolant de l'extérieur un volume défini.

Si nous considérons une surface fermée ◆. le flux créé par des charges électriques au travers de cette surface est donné par le théorème de Gauss (nous n'en donnons pas la démonstration) :

— si la surface enferme des charges, soit au total Q coulombs, le flux sera donné par : $\Phi = \frac{Q}{\varepsilon_0}$ (il ne dépend pas de la position des charges) ;

— si la surface ne contient pas de charges, le flux créé par les charges extérieures à cette surface est nul : $\Phi = 0$.

On peut tirer de ce théorème deux conséquences que nous ne ferons qu'énoncer :
En un lieu où on trouve une répartition de charges correspondant à ρ coulombs par unité de volume, le champ est lié à ρ par l'*équation de Poisson :* $div \blacklozenge \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$ ou encore par l'*équation de Laplace* : $\Delta V \blacklozenge = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$.

◆ $div\ \vec{E}$: divergence de $\vec{E}$ (voir Aperçu mathématique, page 19).

◆ ΔV = laplacien de V (voir Aperçu mathématique, page 20).

Conséquences pour un conducteur en équilibre

Un conducteur est un corps où les charges qui peuvent apparaître sont libres de se déplacer. Si ce conducteur est en équilibre électrique, les charges qu'il porte sont elles-mêmes en équilibre. Elles ne se déplacent pas et ne sont donc soumises à aucune force, donc à aucun champ.

Par conséquent, dans un tel conducteur, le champ est nul : $\vec{E} = 0$, et le potentiel V est constant.
S'il existe des charges libres, elles ne peuvent se trouver qu'à la surface du conducteur : toute charge à l'intérieur entraînerait l'existence d'un champ, conformément à l'équation de Poisson. Quant à la répartition des charges sur la surface, elle se fait précisément de manière à ce que le champ soit nul à l'intérieur du conducteur ◆.
De même, dans le cas de plusieurs conducteurs chargés, chacun d'eux crée un champ influençant la répartition des charges sur les autres, de telle façon que le champ reste nul à l'intérieur de chaque conducteur. C'est le phénomène d'influence électrique, qui trouve une application importante dans les condensateurs.

◆ Cela est vrai, que le conducteur soit creux ou plein : les charges de la surface du conducteur — et celles de l'extérieur — n'ont aucune action sur l'intérieur. C'est cette constatation, due à Faraday, qui est à la base de la protection contre les champs électriques (cage de Faraday).

Conducteur en déséquilibre électrique

Dans ce cas, un générateur (pile, dynamo, etc.) entretient un champ électrique entre deux régions du conducteur. Sous l'action de ce champ, les charges mobiles du conducteur (électrons, ions) se déplacent, créant ainsi un courant électrique.
Ces charges, contrairement à ce qu'on croit, se déplacent très lentement dans l'intérieur du conducteur ◆. Elles suivent les lignes de champ et la quantité d'électricité qui traverse une surface unité en une seconde (c'est la « densité de courant ») peut être représentée par un vecteur $\vec{j}$, parallèle au champ électrique $\vec{E}$. On écrit $\vec{j} = \gamma \vec{E}$; γ est la conductivité du milieu, qui est définie par cette relation, dite d'Ohm-Kirchhoff.
C'est de cette relation fondamentale que découlent les lois de l'électrodynamique, en particulier les lois d'Ohm, en remarquant que le flux de $\vec{j}$ à travers la section d'un conducteur n'est autre que l'intensité I du courant qui la traverse.

◆ La vitesse des électrons est de l'ordre du millimètre par seconde (alors que l'établissement du champ électrique qui les met en mouvement est pratiquement instantané).

L'ÉLECTROMAGNÉTISME

Un jour de 1819, Œrsted faisait un cours sur les effets du courant électrique, et montrait le dégagement de chaleur produit par ce courant. Or, au voisinage du circuit, se trouvait une aiguille aimantée, qui déviait chaque fois que le courant passait. C'est ainsi que, par hasard, fut découvert le magnétisme des courants. Dès qu'Arago ♦ eut fait connaître l'expérience d'Œrsted à l'Académie des sciences (11 septembre 1820), son collègue Ampère se mit au travail et, en deux semaines, étaient mises sur pied les lois de l'électromagnétisme et une théorie du magnétisme, anticipation géniale des théories modernes.

♦ Étienne Arago (1786-1853), physicien français. On lui doit l'invention de l'électro-aimant. Comme homme politique, c'est lui qui fit adopter en France le timbre-poste.

Le magnétisme est produit par les charges en mouvement

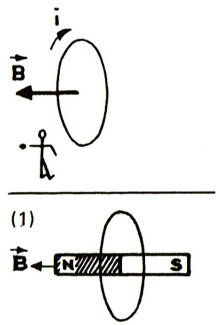
Un aimant crée autour de lui un champ magnétique, qui est caractérisé en chaque point par un vecteur $\vec{B}$, le vecteur ♦ induction magnétique, dont la direction et le sens sont matérialisés par l'aiguille aimantée d'une boussole placée au point considéré : le vecteur $\vec{B}$, porté par l'axe de l'aiguille, est dans le sens sud-nord (la pointe nord est celle qui se dirige vers le nord sous l'action du magnétisme terrestre) ♦. Un courant électrique, tout comme un aimant, crée un champ magnétique, capable d'agir sur une aiguille aimantée et de former des spectres magnétiques. La théorie d'Ampère exprimait l'analogie entre courants et aimants, qui peuvent agir l'un sur l'autre. C'est pour expliquer les résultats des nombreuses expériences confirmant ce fait qu'Ampère énonça la fameuse règle qu'on appelle « règle du bonhomme d'Ampère ♦ ».

♦ Voir Aperçu mathématique, page 17.

♦ On peut matérialiser facilement les lignes du champ magnétique en saupoudrant de limaille de fer un papier sous lequel on a placé un aimant. Le « spectre magnétique » ainsi formé est la carte du champ étudié.

Appliquée à la spire circulaire (1) figurée ici, cette règle nous montre que la spire (boucle parcourue par un courant) crée un champ magnétique perpendiculaire à son plan, et qu'on peut lui attribuer une face nord et une face sud, comme à un aimant, la face nord étant celle d'où sortent les lignes du champ. En particulier, cette spire est capable, comme une aiguille aimantée, de s'orienter sous l'effet d'un champ magnétique. Elle possède un « moment magnétique ». Cette équivalence d'une boucle circulaire à un aimant va entraîner Ampère très loin : il va supposer que, dans la matière aimantée, se trouvent de telles boucles microscopiques et que le magnétisme qu'on observe est celui qui résulte de l'association des effets de chacune des boucles.

♦ Le « bonhomme d'Ampère », placé sur le fil conducteur de telle façon que le courant le parcourt des pieds à la tête, voit les lignes du champ magnétique créé par le conducteur aller de sa gauche vers sa droite.



Cette théorie, à la base des théories modernes du magnétisme, ne trouvera de justification qu'après la découverte de l'électron. Elle rend inutile l'hypothèse des masses magnétiques de Coulomb.
Dès lors, dans ce domaine, les découvertes vont se succéder : Ampère bobine un fil de cuivre en spires consécutives sur un tube, créant le solénoïde dont les effets sont comparables à ceux d'un barreau aimanté.

Laplace énonce la loi ♦ qui donne la force à laquelle est soumis un conducteur placé dans un champ magnétique. Arago introduit dans le solénoïde une barre d'acier qui s'aimante et crée un champ magnétique beaucoup plus important que celui du solénoïde primitif. En remplaçant la barre d'acier par une barre de fer ♦, Sturgeon (1825) crée l'électro-aimant. L'Américain Joseph Henry crée un tel électro-aimant capable de soulever une tonne !

♦ Voir page 192.

♦ Au contraire de l'acier qui conserve l'aimantation qu'il reçoit lorsqu'on le place dans un champ magnétique, le fer est un aimant temporaire. Son aimantation (plus intense que celle de l'acier dans les mêmes conditions) cesse en même temps que la cause qui la crée.

L'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Nous retrouvons Henry qui, indépendamment de Faraday et à peu près en même temps, découvre un phénomène sans lequel le développement de l'électricité n'aurait pu se faire.
En 1832, Henry montre qu'à l'établissement du courant — ou à la rupture de celui-ci — dans un circuit comprenant un électro-aimant, une bobine placée à proximité, mais sans liaison électrique avec le premier circuit, est le siège d'un courant ♦ qu'un appareil de mesure (galvanomètre) peut déceler. Le courant induit est de sens différent à la rupture et à l'établissement du courant dans l'électro-aimant. C'est le phénomène d'induction électromagnétique. Il était clair que ce « courant induit » était causé par les variations du champ magnétique dans l'espace où se trouvait la bobine, ou plus précisément du flux ♦, que le vecteur induction $\vec{B}$ caractérisant ce champ magnétique crée au travers de la bobine.
En effet, de nombreuses expériences montrent qu'un courant induit apparaît chaque fois qu'un circuit est soumis à une induction B variable, ou qu'il se déforme ou se déplace, toutes ces causes produisant une variation de flux à travers le circuit.

♦ Ne pas confondre induction électromagnétique (apparition d'un courant induit) et induction magnétique (vecteur $\vec{B}$).

♦ Le flux magnétique se définit de façon analogue au flux électrique.

ÉTUDE THÉORIQUE SOMMAIRE DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME DANS LE VIDE

Propriétés du vecteur ♦ $\vec{B}$

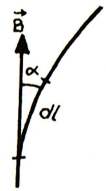
♦ Voir Aperçu mathématique, page 17.

Le champ magnétique (quelle que soit sa cause : courant ou aimant) est caractérisé en chaque point par un vecteur $\vec{B}$, le vecteur induction magnétique, dont les propriétés sont les suivantes :

le flux du vecteur $\vec{B}$, à travers une surface fermée (c'est-à-dire limitant un volume défini) est nul. Cela se traduit mathématiquement en exprimant que sa divergence ♦ est nulle : $div\ \vec{B} = 0$ (on exprime ainsi qu'il n'existe pas de masses magnétiques analogues aux charges électriques).

♦ Voir Aperçu mathématique, page 17.

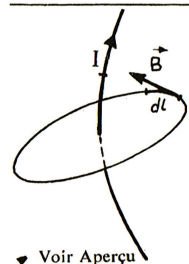
Circulation de $\vec{B}$. On appelle circulation élémentaire de $\vec{B}$ le long d'un élément de courbe dl la quantité $\vec{B} \cdot \vec{dl} = B \cdot dl \cos \alpha$.



Considérons la somme des circulations élémentaires prise le long d'une

courbe se refermant sur elle-même (courbe fermée), ce qu'on note par l'intégrale ♦ : $\oint \vec{B} \cdot \vec{dl}$; si la courbe enlace le conducteur créant l'induction $\vec{B}$, nous aurons l'égalité $\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = \mu_0 I$, qui exprime le théorème d'Ampère, où μ_0 est une constante, la perméabilité magnétique du vide, et I l'intensité du courant parcourant le conducteur.

♦ Voir Aperçu mathématique, page 17.

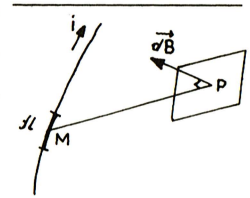


Dans le système international, la constante $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ (on remarque encore une fois l'intervention du facteur 4π).
Le théorème d'Ampère peut s'exprimer, en employant le vecteur densité de courant $\vec{j}$ déjà défini, par la relation : rotationnel ♦ de $B = \overrightarrow{rot}\,\vec{B} = \mu_0 \vec{j}$.

Le potentiel vecteur

♦ Voir Aperçu mathématique, page 19.

On démontre qu'on peut trouver, lorsqu'un vecteur $\vec{B}$ vérifie des relations analogues aux précédentes, un vecteur $\vec{A}$ dont $\vec{B}$ est le rotationnel. $\vec{B} = \overrightarrow{rot}\,\vec{A}$. Le vecteur $\vec{A}$ ainsi défini est le potentiel vecteur magnétique.



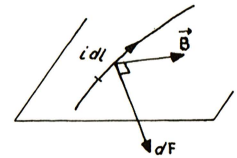
Expression du vecteur $\vec{B}$ et forces électromagnétiques

Un élément de courant de longueur *dl*, parcouru par une intensité *i*, crée en un point P une induction élémentaire $\vec{dB}$ donnée par la loi de Biot et Savart : $\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i\vec{dl} \wedge \vec{r}}{r^3}$, où $\overrightarrow{MP} = \vec{r}$ ♦.

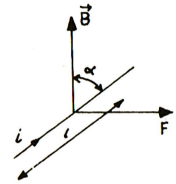
♦ Le signe ∧ indique un produit vectoriel ; il représente une opération qui est précisément celle qui est visualisée par le bonhomme d'Ampère.

Pour un circuit complet, il faut faire la somme des vecteurs $\vec{dB}$, c'est-à-dire calculer l'intégrale : $\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{i\vec{dl} \wedge \vec{r}}{r^3}$.

Quant aux forces $\vec{dF}$ s'exerçant sur une portion de circuit de longueur *dl*, parcourue par un courant *i*, placé dans un champ magnétique d'induction $\vec{B}$, elles sont données par la loi de Laplace : $\vec{dF} = i\,\vec{dl} \wedge \vec{B}$
(ici encore, le produit vectoriel caractérise complètement la force en intensité, direction et sens).



Dans le cas d'un conducteur rectiligne de longueur *l* placé dans un champ uniforme ($\vec{B}$ constant en grandeur, direction et sens), la loi de Laplace est particulièrement simple : la force d'intensité $F = il\,B \sin\alpha$ est perpendiculaire au plan contenant *l* et B. Elle est dirigée vers la gauche de l'observateur d'Ampère couché sur le fil et regardant l'extrémité du vecteur $\vec{B}$.



Travail des forces électromagnétiques

Le travail W des forces électromagnétiques sur un circuit parcouru par un courant d'intensité I est donné par : $W = I(\Phi_2 - \Phi_1)$,
où Φ_1 et Φ_2 sont les flux magnétiques traversant la surface limitée par le circuit dans les positions initiale (Φ_1), et finale (Φ_2). C'est la loi de Maxwell.

L'induction électromagnétique

La f.é.m. induite e, qui crée le courant induit, est régie par la relation de Faraday : $e = -\frac{d\Phi}{dt}$, dans laquelle $d\Phi$ représente la variation de flux traversant le circuit pendant le temps dt, le signe — rappelant la loi de Lenz et exprimant que l'effet s'oppose à la cause : le sens du courant induit est tel qu'il tend à s'opposer à la variation de flux qui le produit.

Les équations de Maxwell

Faisons le point. Il est impossible de séparer électricité et magnétisme, et cette évidence, nous l'avons vu, s'est imposée très tôt aux physiciens du XIXe siècle. Dans ces conditions, une question devait inévitablement se poser : peut-on espérer réunir dans une équation — ou un groupe d'équations — les champs électrique et magnétique ♦ ?
La réponse viendra de Maxwell, qui résumera génialement en quatre équations les propriétés des champs électrique et magnétique et leurs relations, que ces champs soient variables — c'est-à-dire dépendants du temps — ou non. Il ne saurait être question de passer ces équations sous silence, même si le lecteur non mathématicien reste perplexe, car elles ont eu le même retentissement que la loi de Newton et, de plus, des conséquences théoriques et pratiques capitales.

♦ Ce souci d'unification est déjà celui qui animera plus tard Einstein lorsqu'il cherchera une théorie unitaire englobant tous les champs.

Ces équations, nous les avons d'ailleurs déjà rencontrées :

$div\ \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$, qui exprime le théorème de Gauss.

$\vec{rot}\ \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$, qui exprime, sous une autre forme, la loi fondamentale de Faraday : $e = -\frac{d\Phi}{dt}$.

C'est l'équation de Maxwell-Faraday.

$div\ \vec{B} = 0$, propriété de l'induction magnétique.

$\vec{rot}\ \vec{B} = \mu_0\ \vec{j}\ \varepsilon_0\ \mu_0\ \frac{\partial E}{\partial t}$, équation de Maxwell-Ampère.

Dans cette dernière équation, le terme $\frac{\partial E}{\partial t}$ a été ajouté par Maxwell à l'équation traduisant le théorème d'Ampère. Aucune expérience ne justifiait cela à l'époque de Maxwell, et c'est pourtant ce terme qu'on retrouvera plus tard dans l'étude des ondes hertziennes!

Il faut ajouter à ces équations :
— la conservation de la charge électrique, qui s'exprime par :
$div\ \vec{j} = \frac{\partial \rho}{\partial t}$,
— et l'expression de la force qui s'exerce sur une charge q en mouvement à la vitesse $\vec{v}$ dans un champ électrique $\vec{E}$ et une induction magnétique $\vec{B}$.
— $f = q\left(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}\right)$, formule de Lorentz.

Ces équations montrent donc la corrélation entre un champ électrique et un champ magnétique : elles expriment qu'un champ magnétique variable crée un champ électrique et qu'un champ électrique variable produit à son tour un champ magnétique. Il faudra donc désormais parler de champ électromagnétique et cela nous entraîne à d'autres conséquences.

L'intervention du potentiel vecteur magnétique $\vec{A}$ et du potentiel électrique V permet, à la suite de calculs dont nous ferons grâce au lecteur, d'aboutir à une forme très symétrique :

$$\Delta \vec{A} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = - \mu_0 \vec{j} \; ; \; \Delta V - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

Dans un milieu où n'existent ni charges ($\rho = 0$) ni courants $(\vec{j} = 0)$, le vide, nous aboutissons à :

$$\Delta \vec{A} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} \; ; \; \Delta V = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$$

Or ces équations sont des équations de propagation : Maxwell conclut donc que le potentiel vecteur $\vec{A}$ et le potentiel électrique V se propagent — ainsi que l'induction $\vec{B}$ et le champ électrique $\vec{E}$ — dans le vide à la vitesse $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 . \mu_0}}$. Or seule la lumière est capable de se propager dans le vide. D'où les conséquences importantes de la théorie de Maxwell :

— *la lumière est une onde électromagnétique, propagation simultanée d'un champ électrique et magnétique ;*

— *il est possible de produire des champs électromagnétiques, se propageant dans le vide à la vitesse de la lumière ;*

— *la vitesse de la lumière dans le vide est liée à* ε_0 *et* μ_0 *par la relation* $\varepsilon_0 . \mu_0 . c^2 = 1$.

L'importance des équations de Maxwell est énorme, non seulement par les conséquences qui en résultent, mais encore pour la philosophie de la connaissance. Maxwell nous apporte une théorie justifiant les phénomènes liant électricité et magnétisme et, en outre, comme conséquences de cette théorie, d'harmonieuses conceptions sur la nature de la lumière, conceptions que l'expérience confirmait : Fresnel avait fait usage, dans sa théorie de la lumière, d'un « vecteur lumineux », que Maxwell a identifié à la composante électrique du champ électromagnétique.

C'est en 1887 que Hertz a réalisé pour la première fois des oscillations électriques, produisant, bien au-delà du circuit où elles prenaient naissance, des ondes électromagnétiques, pouvant par conséquent propager de l'énergie à distance. Il ouvrait ainsi la porte d'un domaine passionnant. En 1901, Marconi ♦ réalise la première communication radiotélégraphique transatlantique, grâce au « cohéreur » inventé en 1890 par Branly ♦. Et, de progrès en progrès, les télécommu-

♦ Gugliemo Marconi, né à Bologne en 1874, mort en 1937. Physicien italien, prix Nobel de physique en 1909.

♦ Edouard Branly (1844-1940). Physicien français dont les recherches ont permis l'entrée de la télégraphie sans fil dans le domaine des réalisations pratiques.

nications se sont développées de façon prodigieuse, jusqu'à nous faire assister en direct à un autre exploit humain : la conquête de la Lune. Mais cette confirmation a un autre intérêt : nous montrer que la lumière n'est qu'un tout petit domaine d'un vaste ensemble. Comme tout phénomène vibratoire, l'onde électromagnétique est caractérisée par sa fréquence de vibration ou, dans un milieu donné, par sa longueur d'onde. Dans cet ensemble, dont les longueurs d'ondes vont du kilomètre (émetteurs de la bande des grandes ondes) à une fraction d'angström ♦, pour les rayons X, la lumière visible occupe la plage de 0,4 micron à 0,8 micron ♦. N'est-il pas admirable que tous ces phénomènes soient régis par les mêmes lois?

♦ 1 Å = 10^{-10} m.
♦ 1 micron = 1/1 000 mm.

L'ÉLECTRON

Nous avons beaucoup parlé d'électricité, de fluide électrique. Coulomb a mesuré des charges. Le mouvement de ces charges crée un courant et, par la même occasion, des phénomènes magnétiques. Tout cela, nous le savons, mais le fond du problème subsiste. Quelle est la nature de ces charges électriques? Doit-on considérer la charge comme un fluide continu ou comme des « grains » d'électricité?

L'idée de discontinuité s'introduit au cours du XIXe siècle dans la chimie, science de la matière ♦.
Or, dès 1833, l'étude des phénomènes d'électrolyse par Faraday jette un pont entre la chimie et la physique. Et, lorsqu'on énonce (loi de Faraday) que 96 500 coulombs provoquent le dépôt d'une valence-gramme ♦ de métal à la cathode d'un électrolyseur, il faut admettre que chaque atome porte une quantité d'électricité élémentaire, petite mais finie, facile à calculer.
La théorie atomique fut violemment contestée pendant une bonne partie du XIXe siècle, et il est piquant de constater que l'existence de l'atome fut acceptée le jour où l'on s'est rendu compte qu'il ne méritait pas son nom (qui signifie « indivisible »). Faire admettre par ces mêmes savants positivistes la discontinuité de l'électricité nécessiterait des preuves irréfutables. Ces preuves vont être apportées par l'étude d'un phénomène se produisant lors des décharges électriques dans un gaz raréfié : les rayons cathodiques.

♦ Les lois des combinaisons chimiques suggèrent, en effet, que la matière est constituée de grains élémentaires, les atomes, organisés en édifices plus ou moins compliqués tels que les molécules ou les cristaux.

♦ Puisqu'une valence-gramme contient $N = 6{,}02.10^{23}$ atomes du métal (nombre d'Avogadro), 1 atome porte $\frac{96\,500}{6{,}02.10^{23}} = 1{,}6.10^{-19}$ coulomb s'il est monovalent ou un multiple de cette valeur, suivant sa valence.

Les rayons cathodiques

Il reste dans les collections de physique des tubes contenant divers gaz à des pressions très faibles, et comportant des électrodes qu'on peut relier à une machine électrostatique ou à toute autre source à haute tension. Ces tubes s'illuminent de couleurs diverses et sont les ancêtres de nos modernes néons. Ils étaient connus aux environs des années 1850 et allaient apporter la solution de notre problème.

En 1859, Julius Pflücker réalise une décharge électrique dans un tube où le vide était particulièrement bon. Aucune luminescence du gaz n'apparaît, mais le verre lui-même devient fluorescent, verdâtre, en face de la cathode. Ainsi apparaissent les rayons cathodiques, dont les propriétés se précisent dans les années suivantes :
— ils se propagent en ligne droite et sont émis perpendiculairement à la cathode ;
— ils transportent de l'énergie et semblent être constitués d'un flux de particules douées de masse (Crookes) ;
— ils sont déviés par les champs électriques et magnétiques (Hittorf) et le sens de leur déviation indique qu'ils ont une charge négative, ce que confirme l'expérience de Jean Perrin (1895).
Si l'on ajoute à ces propriétés le fait que ces rayons cathodiques sont parfaitement indépendants de la nature de la cathode, du gaz résiduel de l'ampoule et du verre de celle-ci, il faut conclure que ce sont des corpuscules constituants de toute matière, portant une charge négative et ayant une masse bien déterminée.
L'étude de la déviation par les champs électriques et magnétiques et sa mesure permettent de calculer le rapport $\frac{\text{charge}}{\text{masse}} = \frac{q}{m}$ de ces corpuscules, et ce rapport, restant constant, confirme qu'il n'existe qu'un type de particules. C'est ce que prouve J. J. Thomson en 1898, et c'est aussi à cette époque qu'on baptise pour la première fois ces corpuscules électrons.

Les caractéristiques de l'électron

Il reste à mesurer la charge des électrons. C'est l'œuvre de Millikan au cours d'expériences restées célèbres : il observe, à l'aide d'une lunette, la chute de gouttelettes d'huile, suffisamment petites pour rester en suspension dans l'air et ne tomber que très lentement ♦. Millikan a montré que toutes les valeurs de q trouvées étaient multiples entiers, positifs ou négatifs, d'un même nombre, et que ce nombre n'était autre que la charge élémentaire, celle de l'électron.
Cette valeur a permis de compléter la carte d'identité de l'électron, en précisant sa masse. Les caractéristiques du grain élémentaire d'électricité sont donc :
masse : $0{,}91 \,.\, 10^{-27}$ gramme, soit environ 1 840 fois moins que l'atome d'hydrogène ;
charge : $-1{,}602 \,.\, 10^{-19}$ coulomb.

♦ Les variations de la vitesse de chute sous l'action d'un champ électrique permettent de mesurer la charge de ces gouttelettes.

Interprétation électronique des phénomènes électriques

Très rapidement, il apparut qu'on pouvait rendre l'électron responsable de tous les phénomènes électriques connus : le courant électrique

est un flux d'électrons à travers les conducteurs, et son sens est, par conséquent, inverse du sens conventionnel ♦ ; en toute logique, il aurait fallu changer ce sens, mais il était un peu tard...

Dans d'autres cas, les électrons ne se déplacent pas seuls, mais portés par des particules plus grosses : les ions ♦. C'est ce qui se produit dans les électrolytes, où l'on constate le mouvement simultané des ions chargés positivement (c'est-à-dire ayant perdu des électrons) et des ions chargés négativement (par un excès d'électrons), se déplaçant dans des sens opposés sous l'action d'un champ magnétique.

Le dégagement de chaleur dans un conducteur est dû au choc des électrons en mouvement (ou des autres porteurs de charges) sur les ions fixes du réseau cristallin.

Le rôle de l'électron ne cessera d'augmenter au fur et à mesure que se précisera la connaissance de la structure de la matière. La chimie n'est finalement qu'une affaire d'électrons plus ou moins liés aux atomes et pouvant s'échanger entre atomes ♦. Nous allons voir aussi le rôle prépondérant des électrons dans la théorie moderne du magnétisme. Il n'est guère de domaine de la physique où n'intervienne aujourd'hui ce minuscule électron, invisible, présent dans toute matière, et première en date des particules élémentaires.

♦ L'électron est négatif par référence au signe choisi avant sa découverte, de façon parfaitement arbitraire. Dans cette optique, le courant électrique était un courant de « fluide électrique » positif. Le mouvement réel des électrons se fait en sens inverse du courant conventionnel.

♦ Voir l'article : la Chimie, page 112, et : Ionisation, Électrolyte.

♦ Voir l'article : la Chimie, pages 105 et 106, 112 et 113.

L'ÉLECTROMAGNÉTISME RELATIVISTE

Les équations de Maxwell marquent un des sommets de la physique, qui apparaît à l'époque comme un bel édifice, achevé et sans fissures. On est pourtant à la veille d'une révolution...

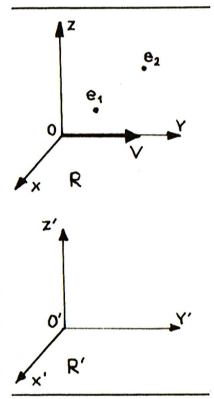
Toutes les ondes connues (mécaniques, sonores) se propageant dans un milieu matériel, la théorie ondulatoire de la lumière supposait également un support matériel pour l'onde lumineuse ou, plus généralement, électromagnétique. Pourtant, celle-ci se propage dans le vide. D'où l'hypothèse de l'« éther », milieu baignant et imprégnant tous les corps transparents et emplissant le vide, impalpable et pourtant élastique comme le meilleur acier. C'est pour mettre en évidence ce mystérieux éther que Michelson et Morley ♦ eurent l'idée de réaliser l'expérience célèbre, qui devait faire percevoir le mouvement de la Terre par rapport à l'éther qui l'entoure. Or cette expérience négative — et non pas manquée — amenait à une conclusion surprenante : la vitesse de la lumière est indépendante du repère choisi pour la mesurer, échappant ainsi à la règle classique de composition des vitesses. Précisons : la notion de vitesse ne s'entend que par rapport à quelque chose, fixe de préférence. Encore faut-il que ce quelque chose existe ailleurs que dans l'imagination des physiciens.

♦ Voir Michelson et Morley (Expérience de)

Considérons un train qui roule à 120 km/h et déplaçons-nous dans le couloir long de 50 m. Pour parcourir le wagon, nous allons mettre 2 mn et nous pourrons dire que le passager marche à la vitesse de 1,5 km/h dans le train. Mais, pendant que le voyageur traversait le wagon, le train parcourait 4 km. Par rapport au sol, le voyageur a donc parcouru en 2 mn : 4,050 km, s'il allait de l'arrière vers l'avant, ou 3,950 km, s'il se déplaçait de l'avant vers l'arrière.

Sa vitesse par rapport au sol est donc 121,5 km/h dans le premier cas, 118,5 km/h dans le second. Cette loi d'addition linéaire des vitesses est valable parce que le train et le voyageur se déplacent bien plus lentement que la lumière.
Dans cet exemple, la vitesse du voyageur est relative au sol, mais la Terre elle-même n'est pas immobile ; elle tourne autour du Soleil et sur elle-même, exactement comme l'électron autour du noyau, et le Soleil lui-même fait partie d'une galaxie dans laquelle il se déplace... et notre quête du système fixe commence à nous paraître illusoire.
Or il se trouve que, si nous étions enfermés dans un wagon complètement fermé allant en ligne droite sans freinage ou accélération, nous n'aurions aucun moyen de savoir que nous nous déplaçons. Cette affirmation est le point de départ de la théorie de la relativité et elle a été énoncée par Galilée. Il n'y a aucune différence sensible entre le repos et le mouvement : pour un physicien, c'est donc la même chose. Un système de référence attaché à ce wagon jouit des mêmes propriétés que le système fixe dont la recherche nous entraînait vers les fins fonds de l'Univers. Un tel système de référence est appelé galiléen ou inertiel.
Or, dans notre exemple, si la vitesse du voyageur dans le couloir n'est pas la même pour un observateur dans le train et sur la voie, la vitesse de la lumière est la même pour les deux.
Pour expliquer les résultats de Michelson, Lorentz avait imaginé une contraction des longueurs. La transformation de Lorentz sera d'ailleurs par la suite utilisée en relativité.
L'autre fissure dans l'édifice de la physique classique vient des équations de Maxwell : l'électromagnétisme n'est pas relativiste, même au sens de Galilée. En effet, les lois de la mécanique sont les mêmes dans tout système de référence galiléen. On pourrait, en généralisant, espérer qu'il en soit de même pour toutes les lois de la physique (et l'électromagnétisme en particulier). Or il n'en est rien!

Supposons deux électrons e_1 et e_2 fixes l'un par rapport à l'autre, dans un certain repère R animé d'une vitesse v par rapport à un repère R'. Pour un observateur lié à R, ces électrons sont au repos et ne créent que des forces électrostatiques. e_1 crée un champ électrique, auquel e_2 est soumis et réciproquement. Il n'y a pas de champ magnétique.
Mais un observateur lié à R', repère par rapport auquel R est en translation, constate le mouvement des charges emportées par R auquel elles sont liées et en déduit l'existence d'un champ magnétique, qui se superpose au champ électrique existant déjà dans le repère R.
La théorie de la relativité restreinte, établie par Einstein ♦ en 1905, lève ces contradictions. En postulant que les lois physiques sont invariantes dans tout l'espace de Minkowski, espace à quatre dimensions où le temps n'a plus son rôle absolu, mais joue le rôle de quatrième dimension, on arrive à exprimer les lois de l'électromagnétisme sous une forme effectivement invariante, c'est-à-dire indépendante d'un repère à quatre dimensions dans lequel on se trouve.



♦ Voir Relativité, Einstein.

Il ne faut plus alors considérer séparément le potentiel électrique V et le potentiel vecteur magnétique $\vec{A}$ séparément, mais comme les composantes

d'un vecteur ♦ de l'espace de Minkowski, le quadrivecteur $\vec{\mathcal{A}}$, potentiel électromagnétique ou potentiel d'univers, défini par :

♦ Voir Aperçu mathématique, page 17.

$$\begin{cases} \vec{\mathcal{A}} \\ i\,\dfrac{V}{c} \end{cases}, \text{ où } i = \sqrt{-1} \text{ et } c \text{ : la vitesse de la lumière.}$$

L'électromagnétisme prend alors une forme cohérente, où il est impossible de séparer champ électrique $\vec{E}$ et champ magnétique $\vec{B}$. La forme prise par les équations de l'électromagnétisme est séduisante : en considérant un autre quadrivecteur, le vecteur $\vec{J}$ dont les composants sont $\vec{j}$ et la quantité $ic\rho$, où $i = \sqrt{-1}$, c est la vitesse de la lumière et ρ la densité de charge, l'électromagnétisme se résume dans les équations :

$$\begin{cases} div\ \vec{J} = 0 \ (div = \text{divergence}) \\ div\ \vec{\mathcal{A}} = 0 \\ \Delta\ \vec{\mathcal{A}} = -\rho_0\ \vec{J} \ (\Delta = \text{laplacien}) \end{cases}$$

où les opérateurs divergence et laplacien ♦ sont appliqués aux vecteurs de l'espace à quatre dimensions, au lieu des trois dimensions classiques.

♦ Voir Aperçu mathématique, pages 19 et 20.

LA MATIÈRE AIMANTÉE

Comment a progressé la science de la matière aimantée depuis l'hypothèse des boucles de courant, appelées ampériens en l'honneur de son auteur? Et quel sera le rôle de l'électron dans ce domaine? C'est ce que nous allons voir maintenant.

Il faut d'abord savoir que, contrairement à ce qu'on croit généralement, toutes les substances sont susceptibles de s'aimanter. Il est vrai que seuls le fer, le nickel, le cobalt et leurs alliages prennent, sous l'action d'une induction magnétique, une aimantation importante.

Quelques définitions :

On peut caractériser chaque substance par un coefficient, sa susceptibilité magnétique qu'on note généralement par la lettre grecque χ (khi).

On appelle intensité d'aimantation $\vec{\mathfrak{J}}$ le quotient du moment magnétique $\vec{M}$ de l'échantillon étudié par son volume V : $\vec{\mathfrak{J}} = \dfrac{\vec{M}}{V}$.

L'induction magnétique $\vec{B}_0$ qui existe dans le vide en un lieu où règne un champ magnétique est liée à l'« excitation magnétique » $\vec{H}$ par la relation $\vec{B}_0 = \mu_0\ \vec{H}$, où μ_0 est la perméabilité magnétique du vide, déjà définie.

Si une substance matérielle est placée à cet endroit, elle s'aimante et prend une intensité d'aimantation $\vec{\mathfrak{J}} = \chi\vec{H}$, et l'induction qu'on observe est la somme de $\vec{B}_0$ existant dans le vide et de l'induction due à l'aimantation $\vec{\mathfrak{J}}$, qui a la valeur $\mu_0\mathfrak{J}$.

L'induction totale vaut donc : $\vec{B} = \vec{B_0} + \mu_0 \vec{J}$, ou $\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H}$, le terme $1 + \chi = \mu_r$ étant appelé perméabilité magnétique relative du milieu.

Classification des substances magnétiques

Toutes les grandeurs ainsi définies, en particulier la susceptibilité magnétique, peuvent être mesurées, et c'est ainsi que Faraday, qui avait déjà montré que l'aimantation était un phénomène général, a pu classer les substances en trois catégories, suivant les valeurs que prend χ :

— *Diamagnétiques*. Ce sont les corps à susceptibilité négative et très faible, ainsi : pour l'eau : $\chi = -0{,}72.10^{-6}$
pour l'alcool : $\chi = -0{,}6.10^{-6}$
pour le bismuth : $\chi = -12.10^{-6}$.

La susceptibilité négative signifie que l'aimantation se fait en sens inverse de l'excitation.

De plus, cette susceptibilité ne dépend pas de la température.

— *Paramagnétiques*. Ces corps ont une susceptibilité positive, faible. Ainsi, l'oxygène a une susceptibilité : $\chi = 0{,}16.10^{-6}$
le chlorure ferrique $FeCl_3$: $\chi = 2{,}6.10^{-4}$.

De plus, elle varie avec la température, suivant une loi due à Pierre Curie (ce fut l'objet de sa thèse en 1895) :

χT = constante ; elle diminue donc lorsque T augmente.

— *Ferromagnétiques*. Ce sont les corps, comme le fer, qui prennent une aimantation importante dans le sens de l'excitation. χ est donc positive, grande, et, ce qui ne simplifie pas, varie avec l'excitation. De plus, les ferromagnétiques deviennent paramagnétiques à une température dite température de Curie ♦. Leur aimantation décroît donc brutalement à cette température, dont voici quelques valeurs : fer : 775° C ; nickel : 350° C ; cobalt : 1 100° C.

♦ Voir ce mot.

Les causes du magnétisme

La structure de l'atome a permis d'élucider le problème qui tourmentait Ampère et de vérifier son hypothèse des boucles de courant dont l'idée avait été reprise par Weber dans sa théorie des courants particulaires, avant la découverte de l'électron ♦. L'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons. Si l'on considère l'orbite décrite par un électron, celle-ci est équivalente à une boucle de courant ; elle est, par conséquent, capable de subir et de créer des actions magnétiques.

♦ Voir page 196.

Une boucle circulaire parcourue par un courant tendra à s'orienter sous l'action d'un champ magnétique, de façon à se placer perpendiculairement au vecteur induction ; encore faut-il qu'elle puisse le faire.

Les différentes orbites électroniques sont suffisamment couplées entre elles pour qu'elles ne puissent pas se déplacer sous l'action d'un

champ magnétique. Mais l'apparition d'une induction magnétique (ou, si l'on préfère, d'une excitation) entraîne, conformément aux équations de Maxwell, l'apparition d'un champ électrique modifiant la vitesse de l'électron. Et cette variation de vitesse fait, à son tour, apparaître une induction magnétique qui est opposée, conformément à la loi de Lenz, à l'induction initiale. Cet effet n'est pas affecté par la variation de température : la structure électronique d'un atome dépend assez peu de ce facteur.

Le paramagnétisme

On peut se demander pourquoi tous les atomes ne sont pas diamagnétiques, puisqu'ils comportent tous des électrons. C'est qu'au diamagnétisme de base se superpose un autre phénomène, principalement dû au spin des électrons. L'électron, comme la Terre, tourne sur lui-même, et c'est ce mouvement qu'on appelle le spin. Il peut tourner dans un sens ou dans l'autre, et la mécanique quantique a montré que deux électrons peuvent se trouver dans le même état, c'est-à-dire dans la même orbitale (disons, pour simplifier à l'extrême, sur la même orbite) s'ils ont des spins opposés, donc s'ils tournent sur eux-mêmes en sens inverse ♦ A cette rotation d'une charge correspond aussi un effet magnétique, se traduisant par un moment magnétique. Deux cas peuvent se présenter .

♦ Voir l'article : la physique des hautes énergies, les Particules, page 415.

— L'atome ne comporte pas d'électrons célibataires : chaque électron crée un moment magnétique, annulé dans tous les cas par l'autre électron tournant en sens inverse. Seul subsiste le diamagnétisme.

— L'atome comporte des électrons célibataires : ceux-ci vont donner un moment magnétique permanent à l'atome. En l'absence de champ extérieur, les moments magnétiques, qu'on peut s'imaginer comme de petits aimants, sont orientés au hasard, dans tous les azimuts. L'effet global est nul. Mais, sous l'action d'un champ extérieur, ils vont s'orienter, et orienter la molécule qui les porte, dans le sens du champ. C'est le paramagnétisme : ici, l'agitation thermique a beaucoup plus d'effet que dans le diamagnétisme et, à une température suffisante, réussit à empêcher l'orientation. On explique ainsi la loi de Curie, que Paul Langevin justifia théoriquement.

L'action des molécules voisines concourt également, comme le champ extérieur, à l'orientation d'une molécule donnée. On parle d'un « champ moléculaire » qui s'ajoute ou se retranche du champ extérieur. Ce champ peut prendre une grande importance.

Le ferromagnétisme

C'est un cas particulier du paramagnétisme, mais la susceptibilité magnétique est beaucoup plus grande (100 à 1 000 fois). Les effets importants qui en résultent ont des applications qui sont bien connues : aimants et électro-aimants.

L'interprétation est la même que pour le paramagnétisme. Mais comment expliquer cette susceptibilité élevée? Pour cela, Pierre Weiss (1907), reprenant les travaux de Paul Langevin, suppose que ce n'est pas un atome ou une molécule qui s'oriente, mais un « paquet » beaucoup plus important (10 000, par exemple), dans lequel le champ moléculaire a déjà créé, même en l'absence de champ extérieur, une aimantation spontanée, et cela d'autant plus facilement que la température est plus basse. En présence d'un champ extérieur, ce sont les domaines ♦ ainsi définis qui tendent à se placer parallèlement à la direction du champ. Ainsi se trouvaient interprétés, dans ses grandes lignes, le ferromagnétisme, l'existence d'une saturation lorsque tous les domaines sont orientés, et la disparition du ferromagnétisme à la température de Curie.

♦ Pour rendre compte de l'absence d'aimantation spontanée, P. Weiss à émis l'hypothèse de petits éléments de volume ou domaines, doués chacun d'une aimantation indépendante des domaines voisins. Statistiquement, toutes les directions d'aimantation pour un domaine sont également probables ; il en résulte que l'aimantation moyenne est nulle. Lorsqu'on soumet la substance à un champ magnétique extérieur, ces domaines s'orientent à la manière d'un aimant, donnant à l'ensemble une aimantation perceptible. Ces domaines ont été mis en évidence par Barkhausen (1919) qui, grâce à un microphone, put faire entendre un crépitement dû à l'orientation des domaines d'un barreau de nickel soumis à un champ magnétique variable.

L'intervention des théories quantiques

D'autres progrès allaient venir avec l'apparition de la mécanique quantique. Nous avons, en fait, déjà parlé de cette dernière à propos du spin des électrons et, pour la commodité de l'explication, l'ordre historique a été bousculé : la loi de Curie et les théories de Weiss ignoraient le spin de l'électron, et c'est bien plus tard que le spin a été reconnu comme la principale cause du magnétisme. En réalité, c'est par le biais du magnétisme que s'est imposée la notion de spin. Une notion particulièrement importante est l'interprétation du ferromagnétisme par Heisenberg. Celui-ci montra en 1928, par des méthodes qui avaient déjà fait leurs preuves dans l'étude de la liaison chimique ♦ (calcul de l'énergie d'échange mise en jeu lorsque deux électrons échangent leurs places dans un édifice), que l'origine du champ moléculaire était cette énergie d'échange entre électrons d'un cristal et que l'état stable correspondait à des spins parallèles, donc à une aimentation spontanée. Cette théorie justifiait les hypothèses de Weiss et conduisait à une interprétation satisfaisante des manifestations connues du magnétisme. Mais elle allait avoir d'autres conséquences.

♦ Voir l'article : la Chimie, pages 112 et 113.

L'antiferromagnétisme

En 1932, Louis Néel en France, et l'année suivante Lev Landau en U.R.S.S., émettent l'hypothèse, suggérée par les théories de Heisenberg, de l'existence d'autres états magnétiques caractérisés par un champ moléculaire négatif. Autrement dit, à l'intérieur d'un domaine, au lieu d'avoir tous les spins parallèles et de même sens, il est possible d'imaginer des états où une moitié des spins est dans un sens et l'autre moitié dans l'autre. C'est l'antiferromagnétisme.
Une substance antiferromagnétique n'a pas de magnétisme visible, puisque les moments magnétiques se détruisent deux à deux. Elle est pourtant caractérisée par une température où cet état cesse, et

qui se manifeste, comme le point de Curie, par des anomalies de propriétés physiques (chaleur massique, par exemple). On appelle cette température *température de Néel.* L'état antiferromagnétique, prévu théoriquement, a été mis en évidence sur des oxydes comme l'oxyde de manganèse MnO. L'étude de la diffraction des neutrons lents a permis, depuis 1945, d'étudier la structure de ces corps.

Le ferrimagnétisme

Assez comparable à l'antiferromagnétisme, le ferrimagnétisme, prévu également par Louis Néel, est un état à champ moléculaire négatif, mais les moments magnétiques ne se compensent que partiellement. Un ferrimagnétique possède donc un magnétisme visible.
De telles substances♦ peuvent donc servir d'aimants, et l'on ne s'en prive guère : les fermetures magnétiques en sont une utilisation. Mais elles ont des utilisations plus ... techniques : les mémoires d'ordinateurs sont constituées de tores (ou anneaux) de ferrites, qui ont sur les aimants en acier deux avantages : elles sont isolantes et peuvent prendre plusieurs états d'aimantation.

♦ Qui tirent leur nom des ferrites, oxydes mixtes de fer et d'un métal bivalent comme le manganèse.

En matière de conclusion...

Où en sont l'électricité et le magnétisme aujourd'hui ? Il semble que ces sciences s'engagent dans deux voies complémentaires.
L'électromagnétisme relativiste, les progrès de l'étude du magnétisme de la matière joints à ceux de la physique du solide ont donné des bases théoriques apparemment inébranlables à des applications dont le monde ne pourrait plus se passer : l'électrotechnique et l'électronique s'engagent sur la voie de la miniaturisation toujours plus poussée et utilisent des courants infimes (encore que ce ne soit pas toujours le cas, dans les grands émetteurs de radiodiffusion, par exemple).
Pendant que se développent ces techniques, la science fondamentale peut-elle encore progresser ? Elle le fait en étudiant le comportement et les mouvements de l'électron, aussi bien dans la matière que dans le vide. Ainsi sont nés lasers, masers et, d'une façon générale, l'électrodynamique quantique.
Quant au magnétisme, après avoir étudié sa principale cause, le spin des électrons, les chercheurs étudient le magnétisme dû à la rotation des particules du noyau, le magnétisme nucléaire, qui exige d'être étudié à des températures très voisines du zéro absolu, sous peine d'être masqué par le magnétisme électronique. C'est ainsi qu'on a pu mettre en évidence, en 1969, l'antiferromagnétisme nucléaire.
Le panorama que nous avons donné est forcément incomplet. Nous espérons pourtant avoir donné au lecteur le désir d'en savoir plus. Nous aurons, dans ce cas, atteint notre but.

Roland Guillemard et Renée Bense.

ÉLECTRODE (Electrode) pages 28, 95, 125, 204, 232, 233, 258, 453, 516, 527.

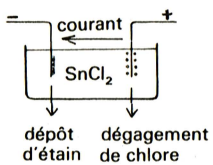
Partie d'un appareil reliée à un générateur électrique.
L'électrode reliée au pôle positif du générateur est l'anode. Celle reliée au pôle négatif est la cathode.

ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE (Quantic electrodynamics) pages 34, 103, 190, 203, 261, 419.

Cette science étudie les interactions entre rayonnement et matière. Appliquée à l'électron, elle permet de préciser les mécanismes des transitions possibles d'un niveau d'énergie à un autre, prévus par la mécanique quantique. Elle permet surtout d'envisager les moyens de réaliser cette transition. On doit à l'électrodynamique quantique les mécanismes d'inversion de populations électroniques et d'émission de rayonnement stimulée ; ces techniques conduisant au maser et au laser, on peut juger de l'importance de cette branche nouvelle de la physique.

ÉLECTROLYSE (Electrolysis) pages 31, 181, 187, 196, 209, 258, 314, 316, 453, 454 529.

Décomposition d'une substance par action d'un courant électrique.
Si on intercale dans un circuit électrique une cuve contenant soit une solution d'acide, base ou sel, ou un sel fondu, on constate le passage d'un courant à travers le bain. En même temps, au niveau des électrodes, apparaissent des dégagements ou dépôts.



Prenons un cas simple. L'électrolyse d'une solution de chlorure d'étain $SnCl_2(Sn^{++}, 2Cl^-)$ produit à l'anode (pôle +) un dégagement de chlore et, à la cathode (pôle —), un dépôt d'étain.
Il y a donc eu, sous l'action du champ électrique existant entre les électrodes, triage des ions en ions positifs (anions) et en ions négatifs (cations).
Au niveau des électrodes, les ions se déchargent, en donnant des produits neutres.
Dans le cas du chlorure d'étain :
— à la cathode, les ions Sn^{++} gagnent 2 électrons et donnent le métal :

$$Sn + 2e^- \longrightarrow Sn\,;$$

— à l'anode, les ions Cl^- perdent chacun un électron en donnant la molécule Cl_2 :

$$2Cl^- \longrightarrow 2e^- + Cl_2.$$

Phénomènes secondaires et applications

En général, l'électrolyse se complique par des réactions des produits de l'électrolyse sur l'électrode, sur le solvant ou entre eux. Par exemple, si on reproduit l'électrolyse du chlorure d'étain $SnCl_2$ avec une anode en étain, le chlore attaque le métal et reconstitue le chlorure d'étain, qui participe de nouveau à l'électrolyse. Le résultat final est un transport de métal de l'anode à la cathode. C'est la base des applications telles que le nickelage, le chromage ou l'argenture.
L'étude quantitative de l'électrolyse est basée sur la loi de Faraday. Les applications de l'électrolyse sont nombreuses : outre les dépôts métalliques déjà cités, la préparation de l'aluminium se fait par électrolyse ♦. L'électrolyse est aussi le phénomène fondamental des piles et accumulateurs.

♦ On électrolyse un mélange fondu de fluorure d'aluminium (oxyde d'aluminium extrait de la bauxite, minerai d'aluminium le plus courant) pour obtenir l'aluminium à la cathode.

ÉLECTROLYTE (Electrolyte) pages 30, 88, 112, 141, 197, 312, 453, 482.

Solution où peut se manifester le phénomène de l'électrolyse.

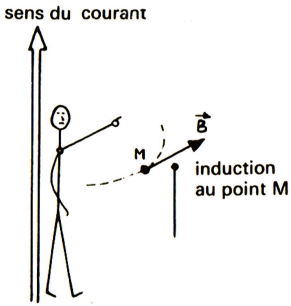
ÉLECTROMAGNÉTISME (Electromagnetism)

pages 26, 83, 145, 183, 191, 193, 198 à 200, 224, 257, 266, 274, 277, 288, 289, 311, 316, 338, 344, 356, 357, 358, 361, 434, 438, 445, 481, 486, 487, 489, 499, 505, 512, 518, 535.

L'électromagnétisme est l'ensemble des phénomènes résultant de la présence simultanée, en une même portion de l'espace, d'un champ magnétique et d'un courant électrique.

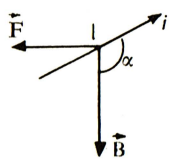
Tout courant électrique, toute charge en mouvement créent un champ magnétique. Le champ, proportionnel à l'intensité du courant, a une direction et un sens donnés par la règle d'Ampère : « Un observateur couché sur le fil de façon que le courant aille de ses pieds vers sa tête, regardant le point où l'on étudie le champ magnétique, voit les lignes de champ aller de sa droite vers sa gauche. »

Réciproquement, le conducteur parcouru par un courant et soumis à un champ magnétique subit des forces électromagnétiques. La force à laquelle est soumis un conducteur de longueur l parcouru par une intensité i et plongé dans un champ magnétique uniforme caractérisé par le vecteur ♦ induction $\vec{B}$ d'intensité B et faisant un angle α avec le conducteur, a pour intensité $F = ilB \sin \alpha$.



♦ Voir Aperçu mathématique.

La direction de la force est perpendiculaire au plan contenant $\vec{il}$ et $\vec{B}$. Son sens est tel que l'observateur d'Ampère, regardant dans le sens de B, est soumis à une force l'entraînant vers sa gauche (tous ces résultats sont contenus dans la formule vectorielle : $\vec{F} = \vec{il} \wedge \vec{B}$, où $\wedge$ est le produit vectoriel).



L'importance des forces électromagnétiques est énorme. Elles sont à la base de tous les moteurs et relais électriques et sont utilisées pour la déviation des électrons dans de nombreux dispositifs (télévision, cyclotron, microscope électronique, etc.).

ÉLECTRON (Electron)

pages 32 à 79, 91, 95, 105, 109, 124, 140, 141, 143, 156 à 160, 171, 177, 196 à 199, 203, 204, 206 à 249, 251, 252, 256, 260, 264, 313, 315, 316, 325, 326, 330, 342, 343, 350, 353, 354, 410, 414 à 416, 422, 428, 439, 440, 447, 449, 451, 481, 482, 485, 501, 512, 516, 518, 521, 522, 538.

Dès la fin du XIXe siècle, les phénomènes de décharge électrique dans un gaz sous très faible pression observés par Crookes (1878) ont conduit à imaginer un grain d'électricité négative, dont la masse et la charge ont été mesurées, respectivement par J.J. Thomson (1897) et Millikan ♦ (1909). C'est l'électron.

♦ R. A. Millikan, physicien américain, conduisit une série d'expériences très précises afin de déterminer la charge de l'électron. Les résultats obtenus par Millikan indiquèrent que la masse d'un électron est 1/1835 de celle d'un atome d'hydrogène.

L'électron apparaît comme un constituant universel de la matière, puisque, quelle que soit son origine, ses caractéristiques sont les mêmes :
masse : $0{,}9 . 10^{-30}$ kg ; charge : $1{,}6 . 10^{-19}$ coulomb, négative.

Il participe à la constitution de l'atome, et l'aptitude des électrons de différents atomes à s'échanger entre eux conditionne les propriétés chimiques des éléments.

On ne peut savoir avec précision si l'électron est un grain matériel renfermant de l'électricité répartie dans sa masse de manière bien définie, et l'hypothèse selon laquelle l'électron est un grain d'énergie électromagnétique équivalente à la masse de $0{,}9 . 10^{-30}$ kg, conformément à la relation d'Einstein, est tout à fait plausible.

Comme toutes les particules, l'électron a une antiparticule. C'est le positron, de même masse, de charge égale mais de signe contraire.

Dans la classification des particules élémentaires, l'électron est placé parmi les leptons, du fait de sa masse faible, de son indifférence aux interactions nucléaires fortes et de son spin de 1/2.

ÉLECTRONIQUE (Electronics)

voir l'article pages suivantes et les pages 24, 90, 95, 105, 110, 113, 136, 158, 176, 182, 183, 203, 233, 260, 272, 410, 417, 518, 522, 524, 534.

L'électronique

par Pierre Prétet et René Launay

DEUX ASPECTS DE L'ELECTRONIQUE

L'électronique, dans le langage courant, est fréquemment associée, voire assimilée, à la réalisation technologique de divers appareils ou machines plus ou moins «intelligents». Elle exploite certains phénomènes physiques pour résoudre des problèmes variés qui permettent de la classer parmi les «techniques»; elle interprète également ces phénomènes au niveau de l'étude de la matière, et particulièrement au niveau de la physique des solides, ce qui lui vaut d'être, par essence, une branche de la «physique». Il en va donc pour elle comme pour l'optique, par exemple, dont le nom peut aussi bien recouvrir la «recherche fondamentale» sur l'explication des phénomènes lumineux que l'art d'étudier certains instruments.

Pierre Prétet, né le 29 juin 1930 à Ugine (Savoie). Licencié ès sciences, ingénieur E.N.S.M.A.

René Launay, né le 26 août 1938. Ingénieur E.S.E.

Ce que la lumière est à l'optique, schématiquement, les « charges électriques » le sont à l'électronique. En tant que science, elle en étudie l'émission, c'est-à-dire la production, et en explique la nature et les effets ; en tant que technique, elle en utilise les diverses propriétés pour la réalisation de « fonctions », à partir de « composants » isolés ou assemblés en « circuits », tout comme le fait l'optique avec des associations de lentilles.

La partie proprement physique de l'électronique ne sera mentionnée ici que pour son rôle d'explication du fonctionnement des «composants électroniques» dont l'association permet d'élaborer des «ensembles fonctionnels».

L'électronique, en tant que partie de la physique

Sans revenir à la progression historique des recherches expérimentales et mathématiques qui aboutirent à la conception ondulatoire

du «champ électromagnétique» intégrant la lumière aux ondes de diverses fréquences, puis à la mécanique ondulatoire qui instaura la notion de dualité «onde-corpuscule», nous évoquerons ici quelques-unes des notions utiles à la compréhension de certains des phénomènes évoqués par la suite. C'est dire qu'à quelques exceptions près l'atome sera envisagé sous une forme élémentaire de «microsystème solaire»◆.

◆ Cette conception, qui est celle de Bohr-Sommerfeld, a fait place à la notion probabiliste d'orbitale (voir l'article : l'Évolution des idées en physique, pages 288 et 289).

Chacun possède en mémoire quelques-uns des phénomènes attribués à l'électricité statique: souvenirs scolaires d'une expérience de physique consistant a frotter avec une peau de chat un bâton d'ébonite, ou avec un morceau de drap un bâton de verre, pour attirer ou repousser une légère boule de sureau enduite de peinture métallisée, port de vêtements en tissus synthétiques, «électrisés» par le frottement de la peau, etc. Ces forces «électrostatiques» d'attraction ou de répulsion sont attribuées à la production de «charges électriques», à la surface des corps qui en deviennent le siège, après frottement ; elles peuvent être de deux signes (les règles algébriques de multiplication « + par + » et « + par — » s'appliquant) et il en est évidemment de même pour les « charges ». Celles-ci sont divisibles en « unités élémentaires » : de nombreux phénomènes — qui tous convergent vers l'atome et ses assemblages en molécules — confirment que cette notion possède effectivement un support physique.

Enlevons le corps «attiré» ou «repoussé» du voisinage de celui ou de ceux qui pouvaient exercer sur lui cette force (ou ces forces); la propriété d'attraction ou de répulsion subsiste, bien que non employée: on appelle champ◆ et, en l'occurrence, champ électrique, cette propriété de l'espace de produire une force sur tout corps électrisé qui pourrait y être placé◆.

◆ Voir l'article : Électricité et magnétisme.

◆ Ce dénominatif de « champ » est utilisé comme un concept mathématique et non encore physique, puisque sa nature n'est pas éclairée par sa dénomination ; pensons au champ de gravitation, par exemple à l'attraction terrestre qui caractérise cette propriété « intrinsèque » de l'espace voisin de notre globe d'attirer toute masse qui s'y trouverait placée.

Un autre «champ de forces», le champ magnétique, peut agir sur les charges électriques en mouvement: un fil parcouru par un courant — c'est-à-dire par une circulation de charges — subit une force lorsqu'il se trouve entre les pôles d'un aimant.

Mais, réciproquement, si l'on peut dire, ce même fil fait dévier une aiguille aimantée, habituellement orientée suivant la composante locale du champ magnétique terrestre: il produit donc un champ magnétique, perturbateur dans cette expérience.

D'une façon générale, une répartition de charges électriques en mouvement crée sur une charge élémentaire — prise pour référence de mesure — également en mouvement une force que l'on peut attribuer à deux origines: l'une qui ne dépend pas de l'un et l'autre des mouvements et dont le «support» est le champ électrique; l'autre qui ne prend naissance qu'avec le mouvement et que l'on attribue à l'existence du champ magnétique. Depuis Maxwell et Hertz, on sait que ce «champ électromagnétique» peut être considéré, dans beaucoup de ses effets, comme étant de «nature ondulatoire» et qu'il englobe des «rayonnements» apparemment d'origine diverse,

ne différant que par leur longueur d'ondes (rayons γ; rayons X; lumières infra-rouge, visible, ultra-violette; ondes utilisées pour la radio, le radar...).
D'après ce que nous venons de voir, on peut identifier les courants électriques à des circulations de «charges élémentaires» et considérer l'existence des conducteurs et des isolants comme résultant d'une mobilité plus ou moins grande des charges, suivant la nature du matériau envisagé.
Cependant, rien, jusqu'ici, ne nous empêche de croire que les « charges élémentaires » ne soient dues qu'à un jeu d'écriture mathématique, permettant une représentation commode d'un certain « pouvoir intrinsèque » de quelques matériaux à provoquer des forces ou certains effets. Non seulement il n'en est rien, mais, à l'échelle employée pour l'étude de l'électrostatique, des courants et de l'action des champs, tout se passe, en fait, comme si la distribution des charges pouvait être infiniment divisible, c'est-à-dire continue. Il faut donc, pour associer à ce mot «charge» une entité «palpable», prouver que l'électricité possède effectivement une nature granulaire et rattacher ensuite cette structure à celle de la matière, siège possible des apparitions statiques ou dynamiques de l'électricité; avant de prouver enfin que — si particule élémentaire d'électricité il y a — sa nature est bien unique dans l'interprétation de tous les phénomènes. Sans insister non plus sur les méthodes expérimentales et mathématiques qui ont permis de fournir des réponses probantes à ces questions, contentons-nous encore d'une description sommaire des résultats essentiels.

La «charge négative élémentaire» a pour «support matériel» une particule, l'électron; la «charge élémentaire positive», de valeur identique à celle de l'électron mais de signe opposé, possède également pour «support matériel» une particule, le proton. Bien que les masses de ces deux particules soient différentes (le proton a une masse 1 840 fois plus élevée que celle de l'électron◆), l'une comme l'autre sont sans commune mesure avec les masses que nous manipulons, et il en est de même pour la valeur de la charge électrique; cela explique pourquoi l'aspect discontinu échappe à la plupart des lois déduites d'expérimentations «globales»: la mécanique des fluides ne fait pas autrement lorsqu'elle considère les gaz comme des milieux continus, tout en les sachant composés de molécules.

◆ Voir le tableau des particules élémentaires, page 439.

Electron et proton sont les deux composants principaux de l'atome, et, en adjoignant au proton une nouvelle particule de masse voisine mais non chargée électriquement, le neutron, nous avons réuni les constituants du «noyau» autour duquel gravitent les électrons attirés par la charge électrostatique du proton.
Pour que la configuration de l'atome soit «stable», compte tenu des forces électrostatiques, gravitationnelles et de celles qui naissent du

mouvement des électrons, ces derniers ne peuvent occuper n'importe quelle orbite autour du noyau: celles qui leur sont permises sont caractérisées par certains «niveaux d'énergie» et le passage d'une «couche» à une autre ne leur est possible que moyennant l'absorption ou la perte d'une quantité discrète◆ d'énergie; ces quanta d'énergie correspondent à des «grains», si l'on peut dire, de rayonnements de fréquences bien déterminées par les variations d'énergie de transfert.

◆ Ou discontinue.

L'énergie nécessaire pour arracher un électron à son orbite atomique est d'autant plus faible qu'il se trouve éloigné du noyau. La couche extérieure — qui ne peut comporter plus de 8 électrons, mais n'est, en général, pas complète — est considérée comme responsable des liaisons chimiques, et ses électrons sont nommés électrons périphériques ou «électrons de valence»; les atomes◆ peuvent perdre ou capter des électrons et devenir ainsi des ions positifs et négatifs. L'attraction électrostatique entre ces ions les rend solidaires dans la formation de la molécule d'un nouveau corps pur non élémentaire◆. Mais cette explication ne suffit pas à l'interprétation de toutes les liaisons chimiques: elle ne rend pas compte, par exemple, de la composition de la molécule d'hydrogène formée des deux atomes les plus simples, puisque possédant chacun un proton et un électron seulement; un autre processus de liaison existe donc: c'est la mise en commun, entre deux atomes (ou plus), d'électrons périphériques◆ (ou de valence) décrivant des orbites que l'on peut comparer à celle d'un satellite gravitant à la fois autour de la Terre et de la Lune; l'énergie de liaison n'est plus d'origine électrostatique et son calcul n'est abordable qu'avec la théorie de la mécanique ondulatoire.

◆ Au départ, les atomes sont électriquement neutres : ils possèdent autant de charges électriques que négatives.

◆ C'est ainsi qu'un atome de sodium cédera un électron à un atome de chlore et que les ions sodium (Na^+) et chlore (Cl^-) formeront une molécule neutre de chlorure de sodium.

Ces hypothèses permettent de rendre compte de la circulation du courant électrique dans les liquides, les gaz ou les solides. Pour les premiers, le phénomène est lié à celui, tant utilisé industriellement, de l'électrolyse: mis en solution, le sel (chlorure de sodium) se sépare spontanément en ions positifs (sodium moins un électron) et négatifs (chlore plus un électron); un champ électrique établi entre deux électrodes plongées dans la solution provoque le déplacement des ions négatifs et positifs en sens opposés, et l'ion sodium récupère son électron au contact de l'électrode négative (cathode) qui en est chargée, tandis que l'ion chlore perd le sien au contact de l'électrode positive (anode); pendant la traversée de la solution, les ions ont donc, en quelque sorte, transporté des électrons d'une électrode à l'autre, assurant ainsi la continuité du courant électrique. Le phénomène est assez analogue pour les gaz, à ceci près que l'ionisation ne préexiste pratiquement pas à l'établissement du champ électrique et doit, au moins pour les faibles valeurs de celui-ci, être provoquée par des phénomènes extérieurs («bombardement» du gaz par des électrons issus d'une électrode négative, ou cathode;

◆ Voir page 236.

rayonnement X, etc.). Reste le cas des solides, et particulièrement des solides à structure cristalline dont les noyaux des atomes sont disposés régulièrement dans l'édifice atomique; le phénomène, alors, diffère fondamentalement de celui décrit pour les gaz, ne serait-ce qu'en raison de la proximité beaucoup plus grande des atomes. Les électrons périphériques, ou certains d'entre eux, attirés par leur noyau, subissent aussi une attraction non négligeable de la part des noyaux voisins, en même temps qu'une répulsion provoquée par leurs «électrons-frères» des couches inférieures: si une faible force les y invite, ils ont la possibilité de circuler au sein du cristal et de devenir ainsi les «responsables» de la conductivité. Mais, vu leur grand nombre au sein du solide, leur agitation ne se traduit, si l'on n'y met bon ordre, que par un mouvement d'ensemble nul, car à chaque électron s'en trouvera toujours statistiquement associé un autre dont le mouvement sera opposé. Faut-il encore qu'il existe des électrons disponibles pour ce rôle de conductivité, en dehors des électrons de valence qui restent responsables de la cohésion entre les atomes: de là, la mécanique statistique quantique le montre, résulte la différenciation entre isolants et conducteurs◆.

◆ Voir page 236.

Nous venons d'examiner la nature des «charges électriques», leurs supports matériels et leurs principales propriétés au sein de la matière. Comme son nom l'indique, l'électronique s'intéresse, parmi ces charges, tout particulièrement aux électrons; il nous reste à étudier maintenant les mécanismes physiques qui permettent d'en assurer la production.

L'émission d'électrons est obtenue lorsqu'on leur fournit une énergie suffisante pour les arracher à la structure de certains matériaux qui sont la plupart du temps des solides, les conducteurs, bien entendu, mais aussi les semi-conducteurs qui disposent de suffisamment d'électrons libres◆. Les procédés d'émission s'étudient plus aisément dans le vide où l'apparition des électrons ne s'accompagne pas d'effets secondaires d'ionisation◆, mais ils peuvent être également utilisés dans les gaz. Parmi ces procédés, nous citerons:

◆ Voir page 230.

◆ Les électrons en mouvement dans un gaz heurtent les molécules neutres de celui-ci et les ionisent par perte d'un ou de plusieurs électrons au cours du choc.

— Le «bombardement» du matériau par des photons provoquant l'émission photoélectrique, c'est-à-dire la fourniture aux électrons de quanta◆ d'énergie suffisants pour les extraire de leur orbite et les accélérer.

◆ Voir l'article : l'Atome, page 37.

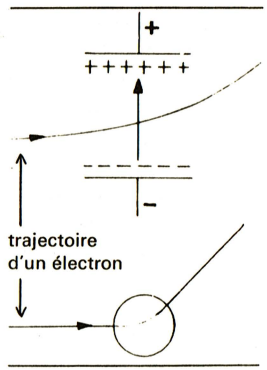
— L'échauffement d'un matériau (filament), provoquant l'émission thermoélectronique◆, c'est-à-dire la fourniture d'énergie par augmentation de l'agitation thermique et sa cession aux électrons.

◆ Ce phénomène fut mis en évidence pour la première fois, en 1879, par Thomas Alva Edison et démontré en 1903 par O.W. Richardson.

— L'action d'un champ électrique élevé provoquant l'extraction des électrons par développement d'une force supérieure à celles qui peuvent les retenir à la surface de la matière.

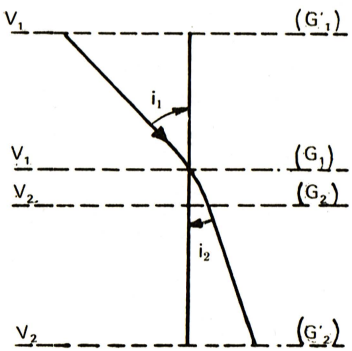
— Le «bombardement» du matériau par des électrons provoquant une émission secondaire qui, superposée à la partie réfléchie de l'émission incidente, peut fournir un bilan positif.

L'action des champs, électriques ou magnétiques, sur les charges élémentaires que constituent les électrons est essentiellement utilisée pour en infléchir les trajectoires. Cette action, en effet, n'est autre que celle d'une force qu'il est loisible de faire agir perpendiculairement à la trajectoire rectiligne initiale de l'électron, trajectoire qu'il eût poursuivie sans cette intervention. La mécanique classique permet de montrer que, sous l'action du champ électrique, la trajectoire d'un électron prend une forme parabolique, tandis qu'elle s'incurve en arc de cercle sous l'effet d'un champ magnétique.

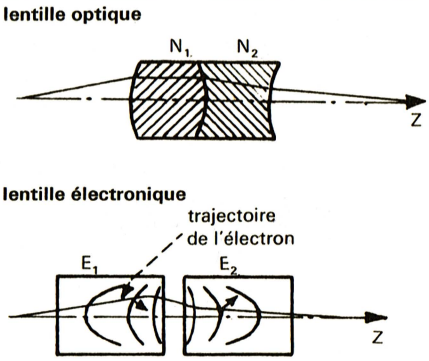


Rôle de l'électronique en tant que technique

Sous cet aspect, l'électronique apparaît comme un «moyen» utilisant, pour des applications diverses, des résultats souvent découverts en physique et dont l'interprétation relève toujours de celle-ci.
Toutes les applications envisagées peuvent être regroupées sous l'appellation d'«ensembles électroniques» qui feront l'objet des paragraphes qui suivent. Il importe néanmoins de présenter deux applications, un peu particulières, qui peuvent aussi s'intégrer dans une chaîne fonctionnelle mais qui, faisant appel aux propriétés de déviation des faisceaux d'électrons, comportent, en outre, un aspect qui illustre les définitions physiques qui ont été évoquées plus haut.
La première application est le «microscope électronique». Un champ électrique (ou magnétique) a le pouvoir de modifier la trajectoire d'un électron; il est donc concevable qu'en faisant traverser à un faisceau très fin, ou pinceau, deux milieux successifs dont les potentiels sont constants mais différents l'un de l'autre, apparaisse une déviation de la trajectoire au passage de la surface de séparation des milieux: cette déviation est analogue à celle que subit la lumière lorsqu'elle traverse la surface de séparation de deux milieux d'indices différents. Toutes les lois de l'optique géométrique sont transposables à celles qui régissent la circulation des faisceaux d'électrons;



Entre les 2 grilles V_1 et V_2, l'électron soumis à un champ décrit un arc de parabole; ainsi sa trajectoire est infléchie.



des lentilles, caractérisées par une variation du champ électrique (ou magnétique) de révolution autour de leur axe, peuvent être réalisées: leur association conduit à la définition du microscope électronique.

Le microscope «optique» est limité par les taches de diffraction◆ qui ne permettent pas la distinction de deux points, au-delà d'un certain grossissement; le microscope électronique est utilisé pour certaines applications dans lesquelles l'échantillon est traversé par un flux d'électrons. Il a 10 000 fois plus de possibilités que le microscope optique, mais il est également limité par la diffraction. L'explication de ce phénomène assez inattendu ne peut être fournie que si l'on admet la structure ondulatoire de l'électron. Ainsi est née la «mécanique ondulatoire», qui associe à chaque particule un rayonnement de longueur d'onde donnée: la notion de grain de lumière◆ (photon) n'est autre que l'une des interprétations de cette théorie.

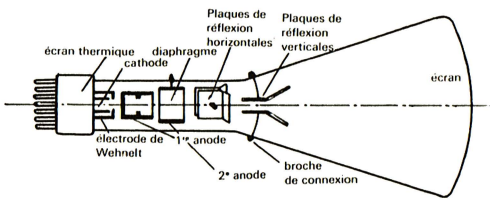
◆ Voir l'article : l'Optique, page 383.

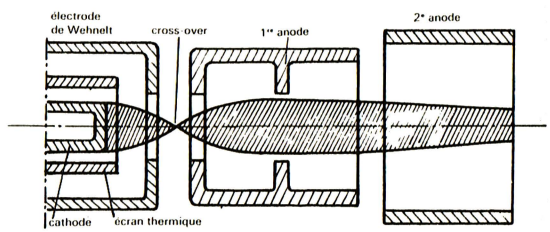
◆ Voir page 37.

La seconde application est un «tube à vide» qui n'a pas pour but la fourniture d'un courant mais la visualisation d'un mince faisceau d'électrons, grâce à la tache qu'il forme sur un écran «fluorescent»: c'est l'oscillographe cathodique; la disposition de deux plaques entre lesquelles règne un champ électrique permet la réalisation d'une déviation d'un faisceau d'électrons dans un plan perpendiculaire à ces plaques; l'adjonction d'un dispositif identique au précédent mais perpendiculaire à lui assure une possibilité de déviation dans un plan normal au premier, de sorte que la combinaison des déviations produites par les plaques P_1 et P_2 ◆ permet de faire décrire à la trace du pinceau sur l'écran n'importe quelle courbe. Pour en compléter brièvement la description, indiquons que l'émission d'électrons est obtenue par chauffage d'une cathode au moyen d'un courant électrique auxiliaire et que diverses électrodes permettent ensuite de «régler» le pinceau◆; ce sont notamment le «Wehnelt», dont le rôle est d'éviter la dispersion des électrons sous l'action des forces latérales qu'ils exercent les uns sur les autres, et les anodes de concentration puis d'accélération du faisceau. Les utilisations de l'oscillographe cathodique sont multiples (il n'est pas de laboratoires qui puissent s'en passer): grâce à la faible inertie du pinceau lumi-

◆ Les plaques P_1 et P_2 représentent les plaques de réflexion horizontales et verticales.

◆ Voir Canon à électrons.





neux, il permet l'observation (visuelle ou filmée) de tous les phénomènes rapidement variables dans le temps et leur comparaison, grâce à la commande par chacun de ces phénomènes de l'un et l'autre champs déviateurs.

Après description de ces deux applications particulières et avant d'aborder les principes sur lesquels reposent la constitution des «ensembles électroniques», puis les éléments qui en permettent la réalisation, examinons quelques exemples qui illustrent la notion de «chaîne fonctionnelle».

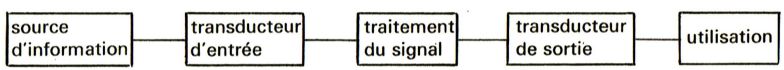
— Une *cellule photoélectrique:* si un rayon lumineux vient à la frapper, elle délivre — le principe en a été montré sinon décrit◆ — un courant électrique qui peut commander un moteur, pour l'ouverture d'une porte par exemple.

◆ Voir page 96.

— Un *thermocouple* placé dans un four subit des changements de température qui se traduisent par les variations d'un signal électrique permettant de commander un dispositif d'alarme, un enregistreur de température ou un régulateur de chauffage.

— Une *antenne* recevant une onde électromagnétique délivre un courant qui peut être traité pour attaquer une membrane vibrante et fournir un signal audible.

Ces exemples (on pourrait en allonger la liste) peuvent tous être représentés par un schéma unique, tel que le suivant :



Dans les exemples précédents :

— la source peut être: l'apparition du rayon lumineux; la température; le «message» porté par l'onde électromagnétique;

— le « transducteur d'entrée », c'est-à-dire tout élément qui transforme le signal en un courant ou une tension électrique — ou une variation de ceux-ci — peut être la cellule, le thermocouple, l'antenne;

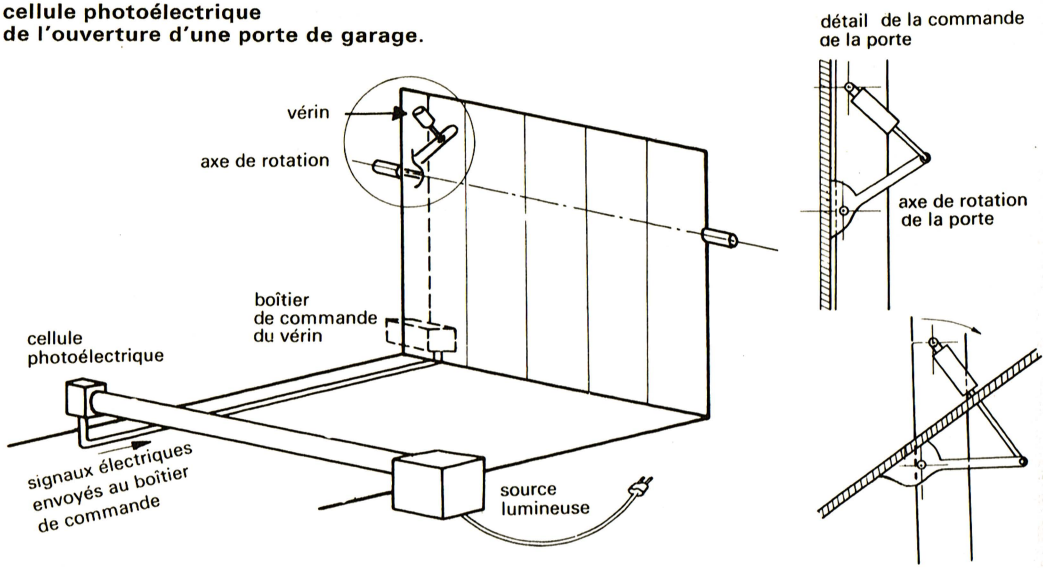
— le «transducteur de sortie» peut être le circuit de commande du moteur, le récepteur du signal d'alarme ou le circuit de commande du stylet de l'enregistreur, le haut-parleur;

— l'exploitation peut être: le fonctionnement du moteur d'ouverture de la porte ; la coupure du chauffage, la lecture de sa valeur ou la variation de sa commande; l'audition d'une émission radiodiffusée.

Sur le schéma◆, l'appareil de «traitement de l'information» destiné à une mise en forme utilisable est constitué par un «ensemble électronique»; peuvent également appartenir à l'électronique certains transducteurs d'entrée ou de sortie qui — et c'est, par exemple, le cas de la cellule photoélectrique — peuvent à la fois jouer le rôle de transducteur et de dispositif de traitement.

◆ Voir page suivante

Commande à l'aide d'une cellule photoélectrique de l'ouverture d'une porte de garage.



CARACTERISTIQUE DES INFORMATIONS ET DES SIGNAUX

En tant que technique, l'électronique offre des moyens de traiter et d'utiliser l'information.
Une information est le contenu d'un message adressé par une «personne» à une autre. L'information — qui peut être plus ou moins «riche» suivant qu'elle apporte au destinataire un nombre plus ou moins grand de renseignements qui lui sont inconnus — est destinée à une certaine utilisation en vue de laquelle elle doit donc être «traitée».

Problèmes liés à la transmission des informations

Tout échange d'information, toute utilisation d'information exigent, quelle que soit la qualité de celle-ci, un certain nombre de mécanismes réalisant diverses fonctions. Pour ce qui est de l'échange — ou de la transmission —, l'énumération de ces mécanismes est simple si l'on se réfère à la conversation usuelle: celle-ci suppose d'abord l'existence d'un «code» connu des interlocuteurs et constitué par un langage commun; elle comprend ensuite le choix d'un « porteur » des signaux codés, en l'occurrence le son, transmis dans l'air ; elle exige enfin des « transducteurs » entre les influx nerveux et

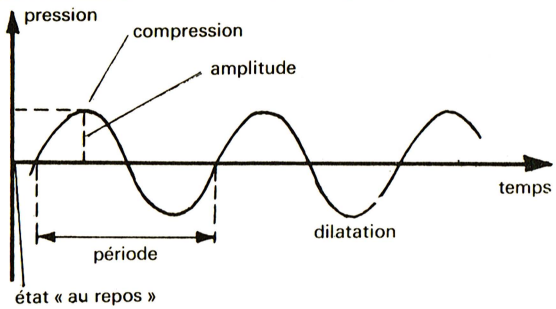
le phénomène sonore à l'émission et à la réception, constitués par les organes de la voix et de l'ouïe.
Pour ce qui est de l'utilisation, la liste des mécanismes pourrait être fort longue si l'on recherchait une stricte analogie entre les capacités de la machine et celles du cerveau; mais la machine ne présente qu'un pâle reflet des possibilités humaines: nous distinguerons dans ses capacités celles qui sont du ressort de la logique (la mémoire, la comparaison, l'association, le choix) et celles qui ont pour objet la solution de problèmes exprimables par les moyens de l'analyse mathématique (les opérations arithmétiques, l'intégration et la dérivation◆).

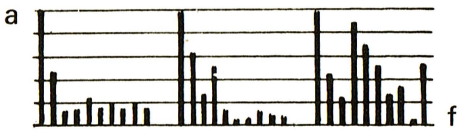
◆ Voir : Aperçu mathématique, page 17.

Nous n'insisterons pas sur la quantité d'informations que peut transmettre un message, voire sur le fait qu'un code soit plus avantageux qu'un autre, sinon pour indiquer que l'organe récepteur doit avoir une capacité suffisante pour la recevoir intégralement. Autrement dit, il est nécessaire d'adapter l'organe récepteur aux signaux qu'il est susceptible de recevoir, et cela quel que soit l'endroit où il se trouve placé dans une chaîne de réception ou de traitement. Puisque l'information n'est pas connue d'avance de son destinataire — ainsi que certaines propriétés du signal qui la porte —, on peut réaliser cette adaptation en donnant à l'organe envisagé la capacité de recevoir et de traiter tout ce qu'il est «raisonnable» d'attendre en débit, quantité, grandeur... C'est ainsi que notre oreille est adaptée à la réception de signaux sonores, allant d'une «certaine» fréquence «grave» à une «certaine» fréquence «aiguë», avec possibilité de variations rapides de cette «fréquence» et de la «puissance», toutes caractéristiques qui suffisent à l'écoute de la voix humaine, par exemple; chez certaines personnes atteintes de surdité, on peut constater une insuffisance notable de certaines de ces qualités; un codage adapté à leur possibilité pourrait leur permettre d'entendre la parole ainsi transformée.

Caractéristiques des signaux «porteurs d'informations»

Examinons donc quelles sont les propriétés des signaux et celles des organes qui doivent les recevoir. Pour ce faire, considérons ces propriétés dans le cas des signaux sonores, afin de rendre plus sensibles des définitions qui ont même représentation mathématique, quelle que soit la nature des signaux.
Un son est un «ébranlement», une vibration qui se propage dans l'air avec une certaine vitesse. Cette vibration est constituée d'une succession de compressions et de dilatations de l'air, c'est-à-dire de variations de pression. Si le son était «pur», cette succession serait très régulière et pourrait être représentée graphiquement par une courbe, formée d'arches successives identiques, dont les sommets représenteraient, autour de la valeur au repos, les amplitudes alter-





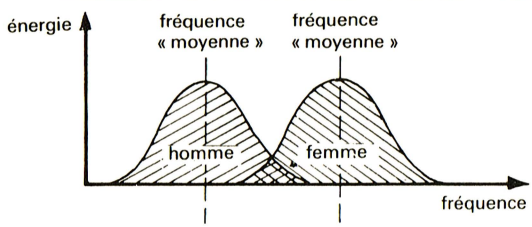
Le spectre harmonique des formes d'ondes d'une note frappée sur un piano avec trois forces très différentes (pianissimo, mezzo forte, fortissimo); le pourcentage harmonique change, mais le spectre conserve un aspect à peu près semblable et c'est ce spectre qui est perçu comme timbre de la note de piano.

nées des compressions et dilatations. Une telle courbe peut être représentée mathématiquement par une fonction sinusoïdale; celle-ci est caractérisée essentiellement par son amplitude et par l'écart qui sépare deux arches successives, écart nommé période, ou par le nombre de périodes rencontrées par seconde, appelé fréquence; cette dernière, numériquement, est l'inverse de la période et sa valeur s'exprime en hertz pour une période en secondes.

Frappons sur une touche de piano: la note obtenue correspond à une vibration d'une certaine fréquence, communiquée à l'air par la vibration de la corde, mais correspond également aux harmoniques◆ de cette fréquence. On peut représenter, en fonction de la fréquence *f*, les énergies transportées par la «fondamentale» et par ses harmoniques: l'énergie totale sera la somme des énergies transportées par chacune des fréquences correspondant à un son pur.

◆ Harmoniques : composantes du son dont les fréquences sont des multiples entiers d'une fréquence qui est dite « fondamentale ».

La voix d'une personne est caractérisée par sa «hauteur» — c'est-à-dire sa fréquence — qui varie, non seulement dans un chant, mais même dans une phrase, suivant les intonations qui y sont mises; elle est aussi caractérisée par sa «puissance», c'est-à-dire par l'énergie qu'elle transporte. On peut donc représenter, ici encore, l'énergie transportée par chaque fréquence; la fréquence prédominante est plus basse chez l'homme que chez la femme, et les énergies «possibles» seront d'autant plus faibles qu'elles correspondront à une fréquence éloignée de la «fréquence moyenne». La courbe qui représente, dans n'importe quel cas, l'énergie «en fonction» de la fréquence s'appelle un spectre.



Déduisons de cela deux remarques:
— Si la tonalité moyenne d'une phrase, écoutée pendant un court instant, nous frappe, cela ne veut pas dire pour autant que toutes les fréquences possibles de la voix sont présentes simultanément, pour chaque son émis: ce n'est qu'avec une écoute suffisamment longue que l'on pourra les trouver toutes, avec leurs «probabilités» respectives d'apparition.
— Le son émis à chaque instant représente la superposition d'un certain nombre de «sons purs», chacun avec son intensité propre: on peut donc la considérer comme la « somme pondérée » de signaux sinusoïdaux.
Pour généraliser à d'autres signaux ce qui vient d'être énoncé pour un signal sonore, notons qu'à une échelle macroscopique les phénomènes «microparticulaires» s'accommodent tous d'une «représentation ondulatoire». Le support des signaux qui véhiculent l'information — lumière ou, plus généralement, ondes électromagnétiques, courant électrique — présente donc toujours une analogie avec le phénomène sonore, lui aussi ondulatoire «macroscopiquement». Les définitions qui viennent d'être données peuvent ainsi se généraliser à beaucoup d'échanges ou transmissions, seules les fréquences en jeu étant modifiées.

Adaptation d'un organe aux signaux reçus

Le signal véhiculant une certaine information entre deux organes est destiné à une certaine utilisation ou transformation : l'organe récepteur doit par conséquent être adapté à ses caractéristiques ou, plus précisément, à toutes les caractéristiques qu'il peut « probablement » posséder. Le récepteur doit être conçu pour recevoir les fréquences du « porteur » qui lui parviennent : l'oreille doit, par exemple, être « branchée » sur les fréquences émises par la voix. Ce fait posé, il reste essentiellement à couvrir la possibilité de recevoir les gammes des amplitudes utiles et la « rapidité » des variations des signaux : le récepteur est donc caractérisé par son domaine de mesure ou « dynamique » (que l'on chiffre par le rapport des amplitudes maximale et minimale qu'il peut recevoir ou le produit par 20 du logarithme de ce rapport, lorsqu'on veut l'exprimer en « décibels » ♦) et par sa « bande passante » ou gamme des fréquences qu'il est capable de recevoir pour traitement, sans déformation.
Tout système d'analyse ou de mesure — fût-il constitué par l'un de nos cinq sens — possède un seuil, niveau au-dessous duquel il ne capte pas ce qui lui est destiné : c'est aussi bien le niveau sonore minimal que notre oreille est capable de percevoir que le pouvoir séparateur de notre œil (on pourrait dire que c'est aussi la limite du pouvoir de représentation de certains phénomènes physiques par l'échafaudage d'une théorie). A l'autre bout de l'échelle des ampli-

♦ Le rapport $\frac{I_{maxi.}}{I_{mini.}}$ peut être grand (pour l'oreille, il est de 10^{14}). On préfère utiliser son logarithme :

$$\log \frac{I_{maxi.}}{I_{mini.}} = x \text{ bels...}$$
$$= 10x \text{ décibels.}$$

Comme il est question d'amplitude, et que l'amplitude de A est liée à l'intensité I d'une vibration par la relation

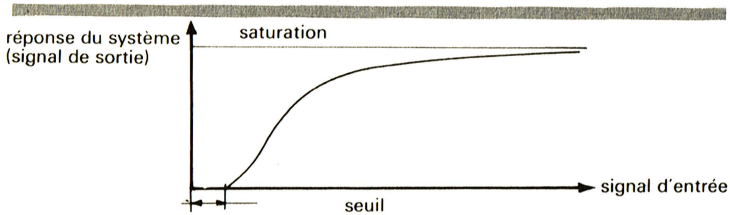
$$I = A^2, \frac{I_{maxi.}}{I_{mini.}} = \left(\frac{A_{maxi.}}{A_{mini.}}\right)^2,$$

or $\log \left(\frac{A_{maxi.}}{A_{mini.}}\right)^2 = 2 \log \left(\frac{A_{maxi.}}{A_{mini.}}\right)$

d'où $\log \frac{I_{maxi.}}{I_{mini.}} = 2 \left(\log \frac{A_{maxi.}}{A_{mini.}}\right) = 20 \left(\log \frac{A_{maxi.}}{A_{mini.}}\right)$ décibels.

tudes, chaque système possède une saturation, par incapacité de distinguer deux phénomènes d'amplitudes différentes et très élevées (dans les exemples que nous avons donnés, les seuils de la douleur ou de l'aveuglement sont atteints). Le domaine d'utilisation — la dynamique — est donc l'intervalle d'amplitude compris entre le seuil et la saturation. Au passage, notons que l'on peut retrouver ces phénomènes à l'émission ; on conçoit qu'une émission électronique, par exemple, ne puisse commencer que lorsque l'énergie fournie dépasse le seuil nécessaire pour arracher les électrons à leurs orbites (c'est pour expliquer ce seuil, en photoémission, qu'Einstein a imaginé la notion de quantum de lumière [ou photon ♦]) ; on conçoit aussi que, entre une anode et une cathode, le nuage d'électrons puisse devenir suffisamment intense pour s'opposer à l'émission d'autres électrons, de telle sorte qu'il se produise ainsi un équilibre donnant un courant de saturation quel que soit le champ électrique appliqué.

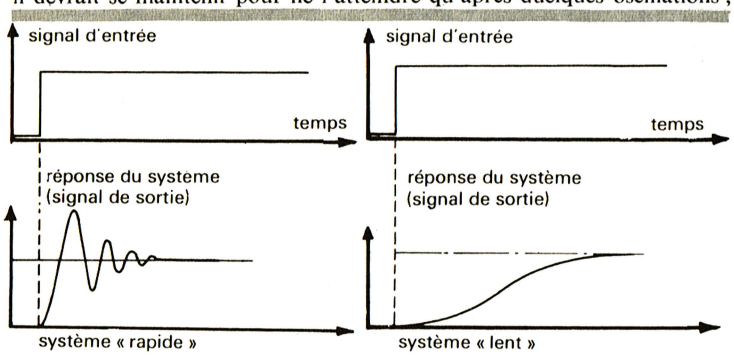
♦ Voir pages 288 à 292.



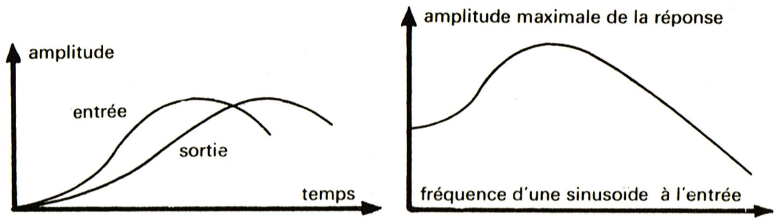
En ce qui concerne la rapidité des variations du signal d'entrée, on conçoit aisément qu'elle ne puisse pas toujours être suivie avec une parfaite fidélité par l'organe récepteur : tout conducteur d'une voiture sait qu'il ne freine qu'avec un certain retard après avoir « détecté » un obstacle (les organismes de sécurité routière savent que cette rapidité de réponse dépend en particulier du taux d'alcool dans le sang, qui — outre l'état euphorique — rend le « système conducteur » moins rapide à répondre à une sollicitation) ♦. Pour un système quel qu'il soit, la « réponse » à une entrée dépend également du fait qu'on puisse le considérer comme « nerveux » ou « mou » :

— « nerveux » (ou rapide), il réagit trop vite et dépasse la valeur à laquelle il devrait se maintenir pour ne l'atteindre qu'après quelques oscillations ;

♦ Tout le monde a pu se rendre compte de la différence des réactions entre une voiture à suspension très amortie — telles que la plupart des voitures américaines — et une voiture à supension raide — telles que certaines voitures de sport.



— « mou » (ou lent), il n'atteint cette valeur qu'avec un certain retard. Dans le premier cas l'on dit qu'il est « peu amorti », alors qu'il l'est plus dans le second.
Lorsque le signal d'entrée n'est pas aussi brutalement variable que sur le schéma précédent, le fait que le système réponde « plus ou moins vite » se traduit par une allure retardée de la réponse que l'on caractérise, pour une entrée sinusoïdale, par ce qu'on appelle un déphasage ♦. ♦ Voir Phase.
Dans la pratique, un signal d'entrée n'est en général ni brutalement variable ni purement sinusoïdal ; il est composé à chaque instant d'une « somme pondérée » de signaux sinusoïdaux. Or la réponse d'un système diffère suivant la fréquence des « sinusoïdes pures » à son entrée : il réagit vivement pour certains, plus mollement pour d'autres, ce que l'on peut traduire en disant que l'amplitude maximale de la première réponse est plus ou moins grande : le système sera utilisable dans la gamme des fréquences où cette amplitude sera telle que la réponse ne soit pas trop déformée ou atténuée.



Cette gamme des fréquences utilisables est ce que nous avons défini comme la « bande passante » du système. Comme elle varie en sens inverse du « temps de réponse », elle est généralement donnée comme l'inverse de ce temps ; toutes les fréquences situées au-delà de cette bande sont coupées ou trop atténuées ; il importe donc, pour réaliser l'adaptation, de la choisir suffisamment étendue pour que « passe » correctement le spectre du signal utile.
Le dernier problème auquel vont se heurter la réception et le traitement d'un signal est celui de sa pollution, si l'on peut dire, par du bruit. Sans compter celui qui existe déjà à la source de l'information ou de l'émission, le bruit qui altère tout signal est dû soit aux sources parasites extérieures, soit au système de réception ou de traitement lui-même. Les sources extérieures de bruit sont analogues, dans leur nature et leurs inconvénients, à celles du bruit de la rue qui trouble nos conversations : elles perturbent certaines émissions radiophoniques ; passage d'un cyclomoteur dont l'antiparasitage est défectueux, enseignes « au néon », etc. Elles correspondent donc à une émission parasite sur la fréquence du signal. Le bruit propre au système de réception ou de traitement provient, en électronique, de l'agitation des électrons : la structure granulaire microscopiquement vient nuire à la pureté du phénomène ondulatoire macroscopiquement en lui ajoutant une « modulation » perturbante.

Nature des signaux utilisés en électronique

Dans les exemples précédents, les signaux se trouvaient en permanence disponibles au niveau de l'organe récepteur ou utilisateur : nous les dirons analogiques. L'information qu'ils transportent se présentait alors sous forme d'une variation de l'une ou de plusieurs des caractéristiques du signal : amplitude, fréquence, phase ♦.

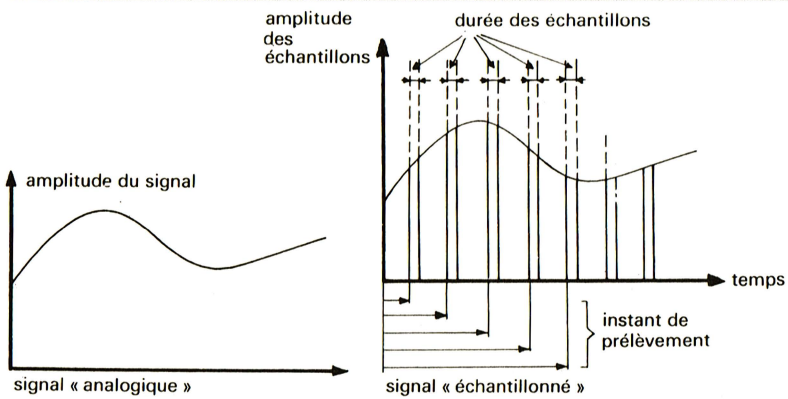
♦ Voir ce mot.

Une autre forme de signal utilisable — et utilisé — consiste à présenter l'information sous forme d'une suite d'impulsions d'amplitude, largeur ou position variable : les signaux sont alors dits « digitaux » ; les échanges de message « codé » par l'alphabet Morse sont une preuve et un exemple de la possibilité de transmission d'informations par un tel procédé. En fait, les signaux peuvent être digitaux « par nature » ou « par traitement » :

— *par nature* : messages par télétype ; impulsions des radars qui, si elles sont réfléchies sur un obstacle, pourront être captés en retour pour donner des informations de présence, de direction, de distance..., de cet obstacle ;

— *par « traitement »* : signaux analogiques « échantillonnés » à une certaine cadence, c'est-à-dire prélevés à des instants précis pendant une certaine durée, comme le montre la figure ci-dessous, puis quantifiés ♦ suivant un certain nombre de niveaux, c'est-à-dire codés ; on peut se demander dans quel but est réalisé un tel échantillonnage qui pose un problème de « conservation » d'une information initialement continue dans le signal analogique : un nombre parfois très élevé d'échantillons peut être nécessaire pour représenter une fonction de fréquence donnée ou pour la retrouver. Il suffit, pour justifier une telle procédure, de savoir qu'elle permet la réalisation de nombreux calculs à l'aide de circuits relativement simplifiés et facilement réalisables avec les techniques de microminiaturisation. Cette simplification technologique exige un codage particulier (la quantification

♦ Quantifiés : c'est-à-dire représentés par un certain nombre de niveaux différents, tous multiples entiers d'une même grandeur.

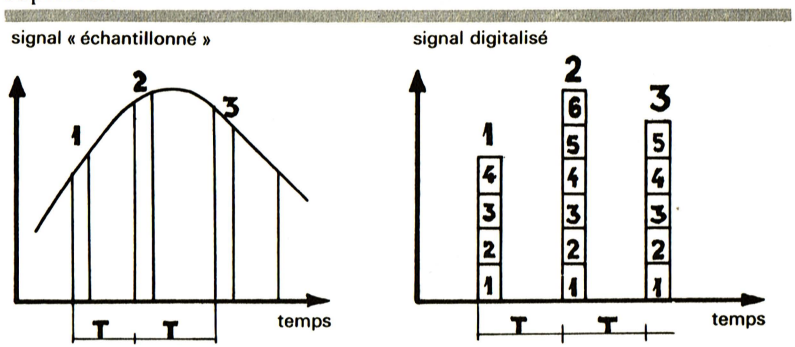


dont il a été question) ; ce codage n'est autre que le « langage binaire ♦ » qui permet une représentation de tout nombre au moyen de deux symboles seulement, au lieu des 10 que nécessite notre représentation décimale usuelle. De la sorte, à chaque instant de prélèvement, l'amplitude du signal peut être représentée par un certain nombre d'impulsions, toutes de même amplitude.

♦ Voir Calcul binaire.

Quantification des signaux échantillonnés

Chacune des impulsions résultant de l'échantillonnage peut être comparée à une impulsion de référence, c'est-à-dire que les amplitudes des signaux seront exprimées en fonction de l'amplitude de l'impulsion de référence ou quantum. Ainsi, un signal dont l'amplitude est 4 fois plus grande que l'amplitude de référence est égal à 4 quanta, et une quantification est dite à n niveaux quand l'amplitude du plus grand des signaux échantillonnés vaut n fois l'amplitude de référence. A noter que l'on arrondit la quantification au quantum inférieur ou supérieur.



Codage binaire

Chaque impulsion étant représentée désormais par son nombre de quanta, on convertit ce nombre décimal en son équivalent binaire. L'impulsion 1, égale à 4 quanta, sera représentée par le nombre binaire 100, puisque l'on passe de l'expression décimale à l'expression binaire en exprimant le nombre décimal en fonction des puissances de 2, le chiffre 4 pouvant s'écrire :

$1 \times (2)^2 + 0 \times (2)^1 + 0 \times (2)^0$ ♦ $= 4$.

$1 \times (2)^2 + 0 \times (2)^1 + 1 \times (2)^0 = 5$, soit en binaire 101.

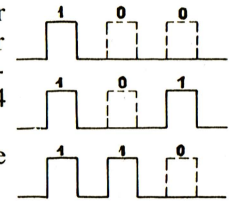
$1 \times (2)^2 + 1 \times (2)^1 + 0 \times (2)^0 = 6$, soit en binaire 110.

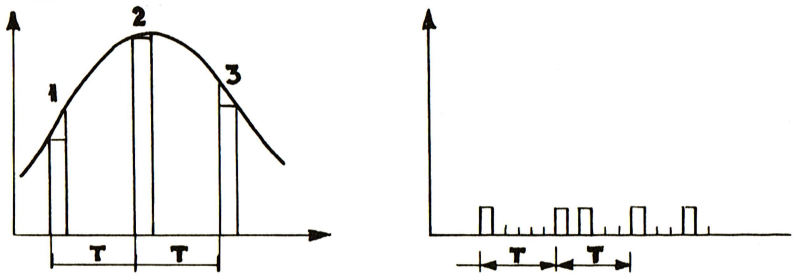
$1 \times (2)^4 + 0 \times (2)^3 + 0 \times (2)^2 + 1\ (2)^1 + 1 \times (2)^0 = 19$, soit en binaire 10011.

♦ $(n)^0 = 1$, quel que soit n réel (nombres entiers, nombres fractionnaires, racines, etc.).

Chaque impulsion peut donc désormais être représentée à l'aide de 2 symboles, le 1 et le 0 ; le codage binaire consiste alors simplement

à exprimer littéralement le nombre binaire à l'aide d'impulsions. Par exemple, le chiffre décimal 4 ou 100 en binaire est exprimé par 1 impulsion de hauteur donnée et 2 « blancs » ou absence d'impulsions. Les exemples figurés ci-contre représentent ainsi les chiffres 4 (ou 100 en binaire), 5 (ou 101 binaire), 6 (ou 110 binaire).
Finalement, le signal quantifié et codé est transmis sous forme d'une suite d'impulsions de même hauteur et de blancs.





FONCTIONS A RÉALISER POUR LE TRAITEMENT DES SIGNAUX

Le traitement des signaux peut être considéré sous deux aspects :
— celui qu'il est nécessaire d'effectuer sur eux en tant que « porteurs d'informations » et qui a pour objet, par leur intermédiaire, le traitement de l'information elle-même ;
— celui qu'il est souvent utile ou nécessaire d'effectuer sur eux pour en faciliter la transmission, l'exploitation et rendre utilisable l'information qu'ils portent.

Traitement des informations portées par les signaux

Le traitement du signal porteur d'information — en définitive, le traitement de l'information elle-même — a pour but, tel que nous l'avons présenté, la solution de problèmes exprimables sous forme mathématique. On objectera justement à une telle définition qu'un poste de télévision, par exemple, n'a pas pour finalité un tel rôle : nous l'éliminons volontairement de cette première rubrique, comme la plupart des appareils de télécommunication ou certaines autres applications, dans la mesure où, en dehors de son rôle supplémentaire de « transducteur de sortie », il possède essentiellement des fonctions d'adaptation du signal en vue d'utilisation. Ainsi, le traitement proposé ici n'est qu'une présentation de diverses fonctions, parfois analogues à celles que nous réalisons journellement :
— la logique nous permet d'apercevoir la nécessité des comparaisons, des mémoires et des circuits « et » et « ou » ♦ : l'ordinateur, pour traiter un problème de décision à partir de plusieurs entrées, les

♦ Voir page 242.

circuits d'un radar, pour comparer les impulsions qu'il émet avec celles qu'il peut recevoir d'un écho, doivent disposer évidemment de « circuits » capables d'effectuer ces opérations ;
— les problèmes mathématiques d'autre nature, en particulier pour des usages scientifiques ou techniques, font appel à — et necessitent donc de savoir réaliser — des opérations arithmétiques ou algébriques, la résolution d'équations de divers ordres, des fonctions d'intégration et de dérivation, etc. ♦. Il importe, à ce sujet, de rappeler un aspect particulier important : celui des systèmes asservis. Cet aspect englobe, en effet, non seulement le but alloué à des dispositifs complets — le pilotage automatique des avions ou des missiles, le contrôle automatique des usines ou des installations diverses —, mais il s'utilise également chaque fois qu'une commande doit s'effectuer malgré des perturbations extérieures, et lorsque le signal varie en fonction du temps ♦. Prenons encore un exemple : un automobiliste reçoit diverses informations qui lui sont communiquées principalement par ses organes de la vue et de l'ouïe (dans son rôle de « centrale d'équilibre ») ; il les utilise pour maintenir son véhicule sur la route : il réalise un asservissement. Cet asservissement a pour but de maintenir une sortie (la trajectoire de la voiture) égale à une entrée variable (les fluctuations du bord de la route), quelles que soient les variations de celle-ci en fonction du temps et quelles que soient les perturbations qui peuvent s'introduire ; il est réalisé grâce à une « boucle de retour ♦ » qui permet de le commander à tout instant par l'erreur qui existe entre la sortie et l'entrée.

♦ Voir Aperçu mathématique pages 16 et 17.

♦ Voir Cybernétique.

♦ Voir Feed-back.

Traitement des signaux porteurs

En ce qui concerne le second aspect de traitement du signal — celui qui est destiné à faciliter son utilisation —, il fait souvent appel, mais sous une forme qui n'est pas toujours liée à l'utilisation directe de l'information, à la solution des divers problèmes évoqués ci-dessus pour résoudre les transformations que nous allons envisager. Ces transformations sont nécessaires ; en effet, s'il est parfois possible d'utiliser directement l'information sans lui faire subir aucun traitement, sous la forme de la réponse électrique d'un « transducteur ♦ », les signaux dont on dispose sont le plus souvent difficiles à utiliser tels quels : leur niveau est trop faible, ils sont accompagnés de signaux parasites, leur fréquence est trop basse... Il est donc nécessaire, pour que l'information qu'ils apportent soit utilisable, de leur faire subir certaines transformations avant de les faire parvenir à l'étage d'utilisation.
Lorsque le signal est transporté d'un émetteur à un récepteur à travers un milieu naturel — tel que l'eau, l'air (ou plus généralement l'espace) — ou à travers un milieu créé pour sa propagation — tel que les fils téléphoniques, les guides d'onde —, l'efficacité de la transmission

♦ Voir page 213.

exige que l'information soit traitée d'une certaine manière, suivant un procédé dit de « modulation ».
Diverses opérations sont ainsi à réaliser sur le signal lui-même :
— la modulation ou la démodulation, nécessitée par son transport ;
— la transcription en langage binaire en vue du traitement mathématique par ordinateur ;
— l'amplification suffisante pour qu'à chaque « étage » le niveau soit adapté au traitement prévu ;
— le filtrage destiné à éliminer toutes les fréquences inutiles et qui peuvent porter du bruit.
Chacun des organes destinés à l'une ou à l'autre de ses fonctions doit posséder les caractéristiques (dynamique ♦ et bande passante ♦) qui lui permettront de ne pas dénaturer au passage la partie utile du signal.

♦ Voir page 217.
♦ Voir page 219.

MODULATION

Nécessité et intérêt de la modulation

Le processus de modulation est une étape nécessaire à la transmission des signaux dans les milieux naturels ou créés pour leur propagation. Que les signaux à transmettre soient continus ou qu'ils aient été préalablement transformés en une suite d'impulsions par codage digital ♦, il est difficile de les transmettre à distance sans passer par l'intermédiaire d'un signal à fréquence plus élevée, autorisant une bonne propagation dans le milieu séparant l'émetteur du récepteur.

♦ Voir page 220.

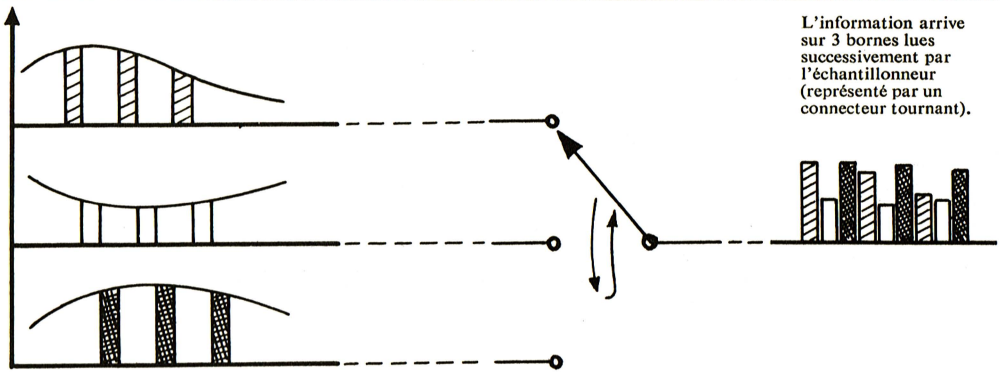
Cette nécessité d'une fréquence élevée pour les transmissions à distance provient, en dehors des phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques proprement dites, des dimensions qu'il est nécessaire de donner aux antennes pour qu'elles puissent avoir une « efficacité » suffisante et de la directivité qui est éventuellement recherchée pour l'émission ♦ (radar). Ces problèmes sont tous liés à la « longueur d'onde » utilisée pour la transmission, c'est-à-dire à la distance qui sépare deux points où le champ électromagnétique possède, au même instant, des caractéristiques identiques, la longueur d'onde étant définie comme le produit de la période par la vitesse de propagation de l'onde ♦. Les lois de l'électromagnétisme prouvent, en particulier, qu'un « radiateur d'énergie » (antenne) est efficace, lorsque ses dimensions ♦ sont de l'ordre de grandeur de celle de la longueur d'onde émise : un signal à fréquence musicale (fréquence de 50 à 20 000 hertz) possède une longueur d'onde de plusieurs kilomètres (10 000 hertz correspondent, par exemple, à $\frac{300\,000\,000}{10\,000}$, soit 30 000 mètres), ce qui rend impossible la réalisation de telles antennes, sauf cas particuliers.

♦ Voir page 246.

♦ La période est égale à l'inverse de la fréquence ; la vitesse de propagation de l'onde, ou vitesse de la lumière, est de 300 000 km/s.

♦ On entend par dimensions, les dimensions géométriques (longueur, hauteur, largeur).

Pour transmettre ainsi une information utilisable à une certaine fréquence — la parole, par exemple — au moyen d'un signal à une fréquence plus élevée, il faut avoir recours au procédé de « modulation », qui consiste à faire varier un paramètre (phase, fréquence, amplitude) d'une onde sinusoïdale dite porteuse (parce qu'elle « porte » le signal utile) en fonction des variations au cours du temps du signal utile. Cette obligation possède divers avantages. De même qu'il est possible de placer les unes à la suite des autres, au cours du temps, les impulsions correspondant à plusieurs signaux échantillonnés (ou voies), de même il devient loisible d'étager les bandes de fréquence et de les transmettre ainsi « en parallèle ».



L'information arrive sur 3 bornes lues successivement par l'échantillonneur (représenté par un connecteur tournant).

Opérer à des fréquences élevées permet d'avoir davantage de « bande passante ♦ » ; entre 550 et 1 600 kHz (kilohertz), par exemple (grandes ondes), il est possible de « loger » 100 émissions en réservant à chacune d'elle une bande passante de 10 kilohertz, mais il est impossible d'émettre dans cette bande un programme de télévision en 625 lignes et, a fortiori, en 819 lignes, car une seule émission exige une largeur de plusieurs mégahertz (7 à 8 au moins [1 mégahertz = 10^6 hertz]) : d'où la nécessité, et l'intérêt, d'une augmentation de la fréquence porteuse à de très hautes (V.H.F. ♦) ou ultra-hautes (U.H.F. ♦) fréquences.

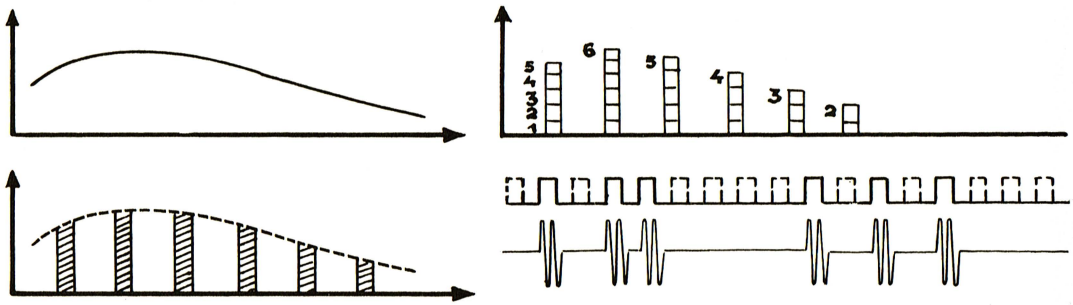
♦ Bande passante : écart entre les fréquences extrêmes du signal émis.

♦ V.H.F. : Very High Frequencies.

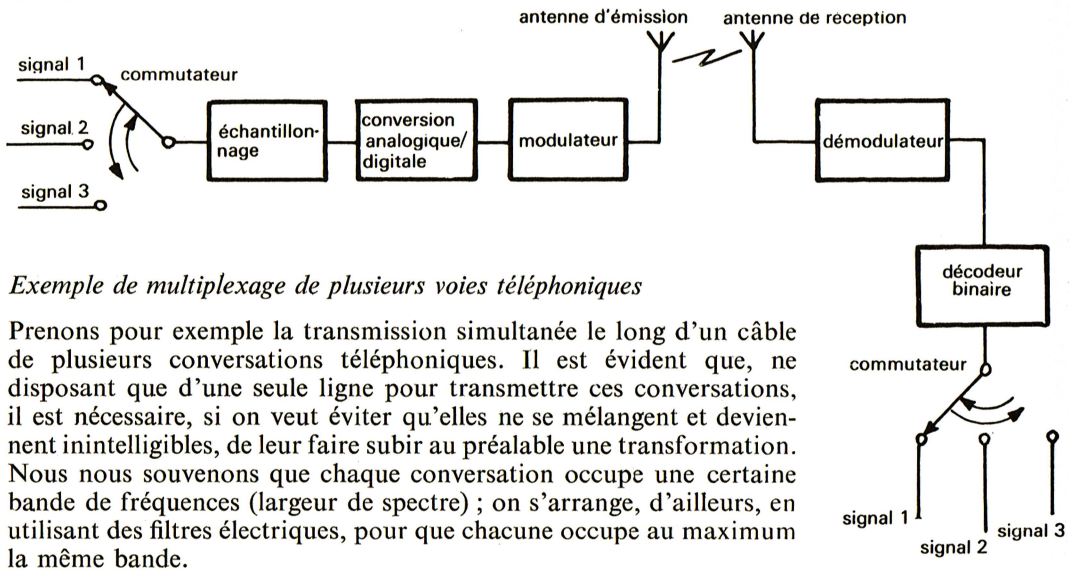
♦ U.H.F. : Ultra High Frequencies.

Modulation de signaux avec échantillonnage

Pour transmettre un signal à l'aide d'une « fréquence porteuse », un premier procédé consiste à échantillonner d'abord le signal — en adaptant la période d'échantillonnage à son spectre de fréquence — puis à quantifier les niveaux des échantillons et les codes suivant le système binaire, de sorte que chaque niveau soit remplacé par un



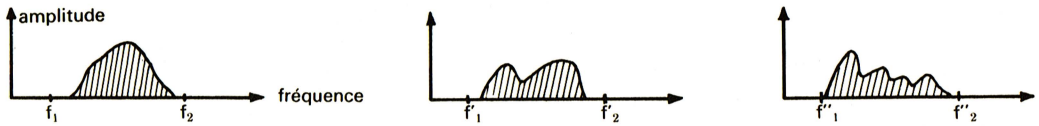
nombre donné d'impulsions de même hauteur, ainsi que nous l'avons décrit. La transmission peut alors s'effectuer en indiquant le nombre d'impulsions qui se trouvent dans chaque niveau successif, et il suffit pour cela, sur la fréquence choisie pour la transmission, d'émettre un nombre de fois égal à ce nombre d'impulsions. Comme chaque impulsion émise ne transporte qu'une faible information — sa présence —, elles peuvent être de courte durée, de sorte qu'entre deux échantillons il y a « de la place perdue » ; celle-ci peut être utilisée en intercalant un ou plusieurs autres signaux échantillonnés. On réalise ainsi un « multiplexage ».



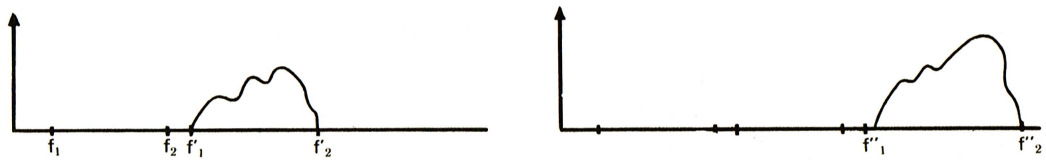
Exemple de multiplexage de plusieurs voies téléphoniques

Prenons pour exemple la transmission simultanée le long d'un câble de plusieurs conversations téléphoniques. Il est évident que, ne disposant que d'une seule ligne pour transmettre ces conversations, il est nécessaire, si on veut éviter qu'elles ne se mélangent et deviennent inintelligibles, de leur faire subir au préalable une transformation. Nous nous souvenons que chaque conversation occupe une certaine bande de fréquences (largeur de spectre) ; on s'arrange, d'ailleurs, en utilisant des filtres électriques, pour que chacune occupe au maximum la même bande.

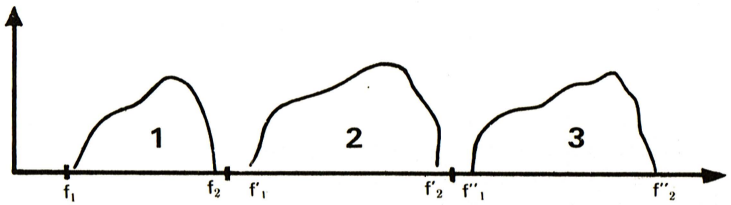
Avant multiplexage (spectres des différentes conversations)



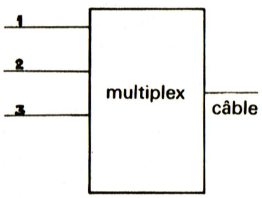
Action du multiplexage



Message transmis le long du câble.

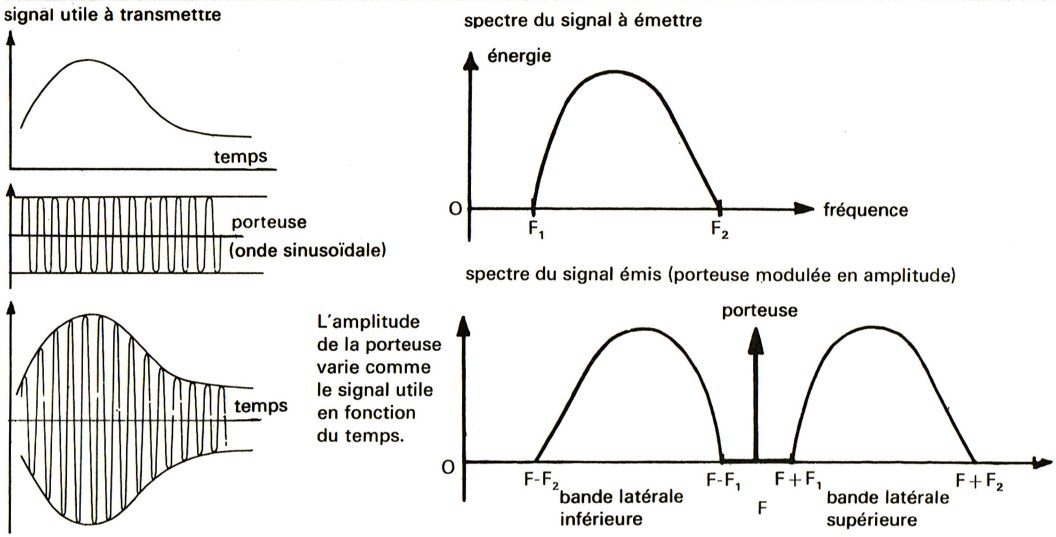


On imagine de décaler successivement le long de l'axe des fréquences les bandes de fréquences occupées par les diverses conversations. Ainsi, la conversation 1 occupera la bande des fréquences comprises entre f_1 et f_2, la conversation 2 sera décalée de façon à se trouver au-delà de f_2, et ainsi de suite. Finalement, les spectres se trouvent étagés le long de l'axe des fréquences et peuvent désormais être transmis sans risque de mélange : on a réalisé un multiplexage. Il va de soi que le processus inverse doit être réalisé à l'autre bout de la ligne pour que la conversation s'établisse entre les correspondants.



Modulation sans échantillonnage

La modulation consiste à faire varier l'un des paramètres (amplitude, fréquence ou phase) qui caractérisent un signal sinusoïdal porteur. Elle est réalisée en composant le signal sinusoïdal fourni par un oscillateur avec le signal utile transformé par un « transducteur » en tension électrique variable. Dans le cas de la modulation d'amplitude, l'amplitude de l'onde porteuse varie en fonction des fluctuations du signal à transmettre, comme le montre la figure de la page suivante.
L'énergie du signal émis est concentrée autour de la fréquence porteuse et dans deux bandes dites latérales qui se réduisent à deux raies lorsque le signal utile est, lui aussi, sinusoïdal.



Les deux bandes latérales contiennent la même information et la porteuse elle-même n'en contient pas : il y a donc un « déchet » dans l'utilisation du spectre de fréquence, qu'il faut éviter ; par des « filtrages » appropriés, il est possible de supprimer la porteuse — qu'il faudra fabriquer à nouveau à la réception avant de reconstituer le signal — pour obtenir un « dispositif à suppression de porteuse » ou l'une des deux bandes pour réaliser un « dispositif à bande latérale unique ». La gamme de fréquences gagnée peut être alors utilisée pour une autre émission.
De même que l'amplitude, la fréquence (ou la phase) de la porteuse peut être modulée par le signal utile. Bien que la modulation de fréquence exige une bande passante plus large que celle de l'amplitude, elle lui est souvent préférée, car elle conduit à une meilleure discrimination du signal au milieu des sources parasites.

LES MOYENS DE L'ÉLECTRONIQUE : LES COMPOSANTS

Dans cette partie, nous présenterons la façon dont sont utilisés certains mécanismes de la physique pour obtenir des éléments ou « composants » dont l'association ou la combinaison permettent de réaliser les fonctions nécessaires au traitement de l'information contenue dans les signaux électriques.

Éléments actifs ou passifs

Un circuit est un assemblage d'éléments ou composants actifs et passifs en vue de réaliser une fonction ou une partie de celle-ci :

— Les éléments actifs sont ainsi appelés parce qu'ils ont la propriété d'agir sur un courant d'électrons, c'est-à-dire essentiellement de conduire ou de bloquer le courant ou de l'amplifier. Ce sont les tubes à vide (diode, triode...) et les éléments à semi-conducteurs (diodes à jonction, transistors...).
— Les éléments passifs, qui n'ont pas la propriété précédente, sont seulement capables de dissiper ou d'emmagasiner l'énergie ; ce sont les résistances, les self-inductances et les condensateurs. Ils sont indispensables à la réalisation des circuits ♦.

♦ Voir pages 240 à 245.

Les tubes électroniques : généralités

Les transistors et les autres composants à semi-conducteur ♦ ont largement remplacé les tubes à vide, comme la pentode et la triode, dans les applications ne nécessitant pas des puissances trop importantes, surtout aux fréquences élevées, par exemple pour la construction de récepteurs de radio ou de télévision. Néanmoins, malgré les progrès spectaculaires des éléments à semi-conducteurs dont le domaine s'accroît sans cesse, les tubes électroniques sont irremplaçables actuellement dans certaines applications. Le fait qu'ils puissent fonctionner à des tensions très élevées les rend particulièrement utiles pour la réalisation d'oscillateurs ou d'amplificateurs de grande puissance, pour la génération d'impulsions ainsi que pour des applications particulières. Les tubes électroniques sont très utilisés dans les « étages de puissance » des émetteurs de radio, de télévision, de télécommunication en général, dans les modulateurs des amplificateurs à haute fréquence, dans la génération d'impulsions pour les radars, etc.

♦ Voir pages 236 à 240.

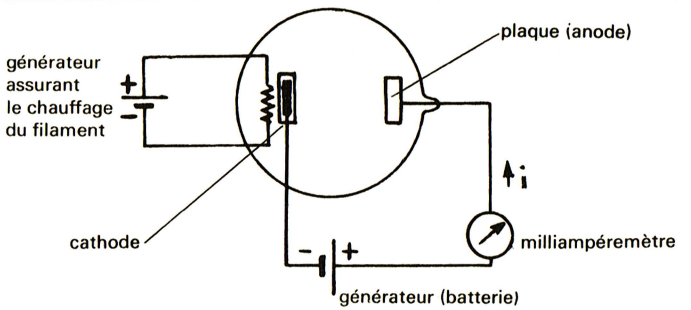
Tous les tubes électroniques utilisent pour leur fonctionnement, que ce soit dans le vide ou dans un gaz ionisé, le flux d'électrons émis par la surface d'un solide appelé cathode ; les électrons sont émis grâce aux procédés d'extraction par apport d'énergie, qui sont :
— l'élévation de la température de la cathode : émission thermoélectronique ;
— le bombardement par d'autres particules, en général, des électrons : « émission secondaire » ;
— l'action d'un champ électrique élevé ♦ ;
— l'action des photons ou effet photoélectrique ♦.

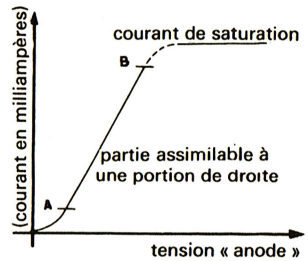
♦ Voir page 210.
♦ Voir page 449.

Tubes à vide pour fréquences moyennes et basses

Effets thermoélectroniques : la diode

Sous l'action de la chaleur, les électrons à la surface d'un métal, placé dans le vide, peuvent rompre les liaisons qui les maintiennent sur cette surface ; pour obtenir des électrons, on peut donc chauffer un métal dans une enceinte où le vide a été fait. Les électrons qui





peuvent se rendre libres appartiennent aux couches périphériques des atomes et leur sont faiblement liés. Sous l'effet de la chaleur, les électrons acquièrent des vitesses réparties suivant une certaine loi de probabilité, leur vitesse moyenne croît avec la température. Les électrons qui peuvent se libérer de la surface sont ceux qui acquièrent suffisamment de vitesse ou encore ceux dont l'énergie cinétique $\left(\frac{1}{2}mv^2\right)$ est supérieure à une certaine valeur W_o caractéristique du métal, appelée affinité électronique ou travail de sortie.

Si les électrons ne sont soumis à aucune action extérieure, ils forment autour de l'électrode émissive un « brouillard électronique ». Mais, si l'on place dans la même enceinte une électrode supplémentaire positive dite anode, les électrons (charges négatives) seront attirés par elle et quitteront l'électrode émissive (cathode) ; effectivement, lorsque les deux électrodes sont reliées aux pôles d'une batterie — la cathode au pôle « moins », l'anode au pôle « plus » —, un milliampèremètre ♦, placé dans le circuit, indique le passage d'un courant ♦ ; ce courant n'existe plus si les connexions à la batterie sont inversées : on a réalisé une *diode*, le plus simple des tubes électroniques. Le courant, fonction de la tension appliquée entre la cathode et l'anode, c'est-à-dire du champ électrique, a l'allure représentée sur la courbe ci-dessus, dite courbe caractéristique.

Commençant par croître proportionnellement à la tension (courbe AB) appliquée, le courant ne saurait pourtant dépasser une valeur limite, appelée courant de saturation : cette valeur limite théorique correspondrait au cas où tous les électrons qui peuvent être émis par la cathode seraient captés par l'anode. En réalité, si on relève la courbe représentant le courant en fonction du potentiel de l'anode, on constate que le courant n'atteint jamais cette valeur théorique. Ce phénomène s'explique par le fait que les électrons transitant entre la cathode et l'anode forment un nuage de charges qui créent un champ électrostatique opposé à celui dû à la tension appliquée entre l'anode et la cathode, et donc défavorable à l'émission.

On dit que le courant est limité par la charge d'espace ♦.

♦ Milliampèremètre : appareil destiné à constater et mesurer les faibles courants électriques.

♦. Le courant circule, dans le circuit, conventionnellement, du pôle + au pôle — du générateur et il correspond à un déplacement des électrons dans le sens inverse (puisque les électrons sont chargés négativement).

♦ Les électrons circulant entre anode et cathode créent dans l'espace compris entre ces deux électrodes ce qu'on appelle la « charge d'espace ».

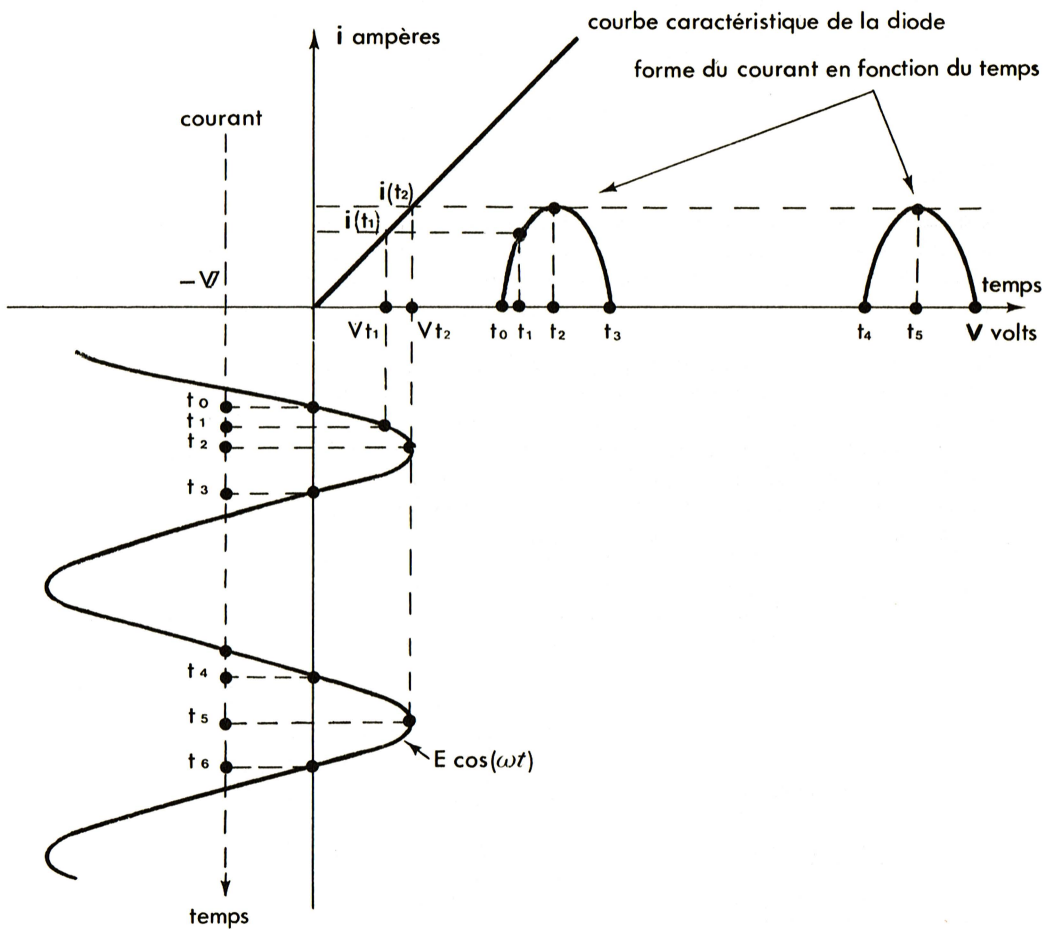
Utilisation des diodes

On n'utilise pratiquement plus les diodes, sauf cas particuliers, depuis que l'on peut réaliser, de façon très économique, leur équivalent avec des semi-conducteurs. Néanmoins, on conçoit qu'elles aient été utilisées et puissent l'être encore :

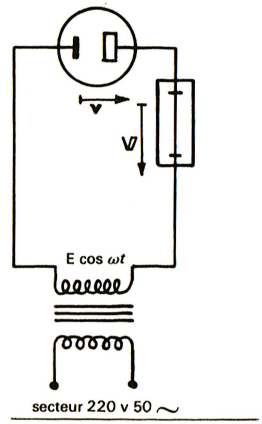
— comme « valve » de redressement pour obtenir une tension continue ♦ à partir d'une tension alternative entre l'anode et la cathode, en utilisant le fait que la diode ne laisse passer le courant que lorsque l'anode est positive par rapport à la cathode.

♦ Ou du moins de sens constant.

Pour construire graphiquement la forme du courant de sortie, prenons pour exemple la charge d'une batterie d'accumulateurs à l'aide d'un chargeur constitué par une simple diode ; on suppose



que la courbe caractéristique de cette diode est linéaire, c'est-à-dire que la courbe représentant le courant traversant la diode en fonction de la tension entre la cathode et l'anode est une droite. Le circuit est réalisé comme l'indique la figure ci-contre : la diode, la batterie et le secondaire d'un transformateur sont branchés en série. A chaque instant, on a la relation suivante : $v = E \cos(\omega t) - V$, V étant la différence de potentiel aux bornes de la batterie, v étant la tension entre l'anode et la cathode de la diode (E est plus grand que V). Cette relation nous permet de construire graphiquement le courant qui charge la batterie.



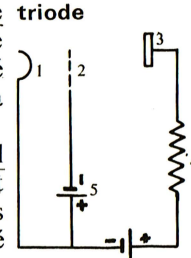
La tension alternative $E \cos(\omega t)$ variant en fonction du temps devient alternativement positive, nulle, puis négative, etc. Ce n'est qu'aux instants t_0, t_1, t_3, . . . t_4 et t_5 que la différence : $E \cos(\omega t) - V$ devient positive ou que la tension v entre anode et cathode devient positive et donc que la diode peut conduire ; ainsi, à l'instant t correspond $v(t_1)$; on lit directement sur la caractéristique le courant qui est $i(t_1)$; à l'instant t_2 correspondent $v(t_2)$ et $i(t_2)$, etc. Le courant redressé affecte au cours du temps la forme d'arches de sinusoïdes.

La triode

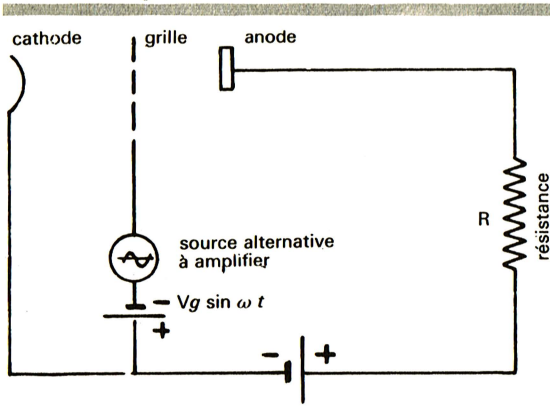
On réalise une triode en introduisant dans le tube à vide une électrode supplémentaire (appelée grille) entre l'anode et la cathode. Cette électrode est soit effectivement une grille très fine, soit un fil enroulé en spirale sur un cylindre ayant le même axe que le cylindre de la cathode.

Cette électrode supplémentaire est, en général, portée à un potentiel légèrement négatif par rapport à la cathode et, de ce fait, ne peut attirer les électrons comme l'anode ; par contre, elle est à mailles suffisamment larges pour les laisser passer. De plus, sa proximité avec la cathode influence le champ électrostatique au voisinage de celle-ci ; une faible variation de la tension de la grille entraîne une variation importante du courant circulant entre la cathode et l'anode.

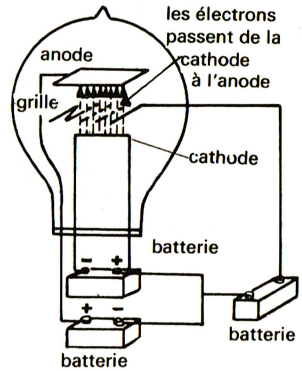
triode



1. cathode
2. grille
3. anode
4. resistance
5. générateur « polarisant » négativement la grille par rapport à la cathode



Si on superpose à la polarisation de la grille une tension sinusoïdale $V_g \sin \omega t$, le courant circulant dans R (résistance) est, en se plaçant dans des conditions convenables, proportionnel à la tension V_g : la tension aux bornes de R est donnée par : $V_R = -QV_g \sin \omega t$, où Q est un coefficient d'amplification, relié aux paramètres caractéristiques du tube et dépendant de la valeur de la résistance mise dans le circuit.



Si, dans le circuit relié à l'anode, on place une résistance de valeur suffisante, on recueille aux bornes de celle-ci une tension, qui varie en sens inverse de la tension de la grille, mais dans des proportions plus importantes. On a réalisé de cette manière une amplification. L'amplification des signaux et l'une des principales applications de la triode. Un signal appliqué à la grille donne dans le circuit d'anode un courant qui lui est proportionnel et qui peut agir, par exemple, sur un haut-parleur, ce que ne pourrait faire le signal initial.

Tubes à grilles multiples

On distingue ces tubes par le nombre total d'électrodes qu'ils possèdent ; ainsi, une pentode est une lampe à 5 électrodes, à savoir une anode, une cathode et trois grilles. L'adjonction de grilles supplémentaires a certains avantages, en particulier pour l'amplification de puissance ; les pentodes ont un meilleur rendement que les triodes.

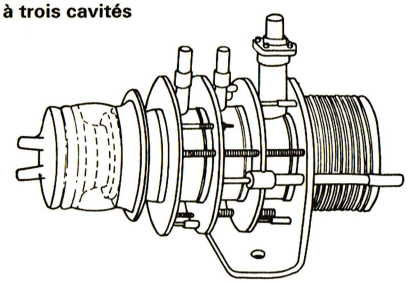
Limitation en fréquence des tubes à grilles

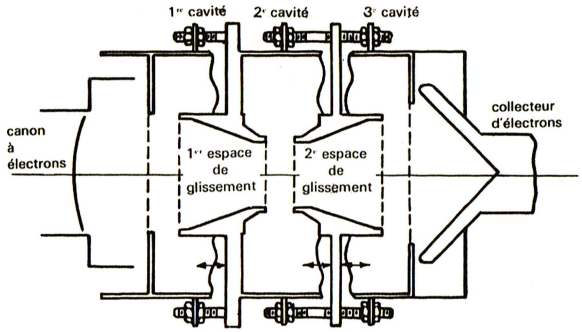
Quoiqu'on ait pu utiliser les tubes à grilles jusqu'à des fréquences élevées, avec des puissances importantes, grâce à l'amélioration de la technologie (remplacement du verre par la céramique, meilleure conception, etc.), il n'est guère possible, comme nous allons le voir, de les utiliser aux très hautes fréquences à cause des limitations inhérentes à leur mode de fonctionnement.

Tubes à vide pour hyperfréquences

On nomme ondes ultra-courtes ou hyperfréquences cette partie du spectre radioélectrique comprise entre 10^9 Hz et 3.10^{11} Hz. A ces fréquences qui incluent les fréquences employées par les radars, les tubes fonctionnant, à l'aide d'électrodes, par contrôle de la densité du courant électronique, ne peuvent opérer de façon satisfaisante. Le temps que mettent les électrons à parcourir à l'intérieur du tube l'espace entre la cathode et l'anode étant de l'ordre de grandeur de la période du signal à amplifier ou à traiter, il se produit des phénomènes qui limitent considérablement les possibilités de ces tubes. Aux fréquences considérées, les tubes que l'on utilise reposent pour leur fonctionnement sur des principes différents ; ils utilisent les propriétés de modulation de la vitesse des électrons émis par la cathode. Nous allons expliquer cette notion en décrivant le fonctionnement d'un tube largement utilisé dans les télécommunications et le radar : le klystron amplificateur (à trois cavités).
Le klystron amplificateur comporte trois cavités résonantes de forme rentrante, séparées par un tunnel ou « espace de glissement » et munies sur leurs axes d'ouvertures permettant le passage du faisceau d'électrons. L'énergie à amplifier est amenée à la première cavité

Klystron amplificateur à trois cavités





par une ligne, l'énergie amplifiée est amenée à la charge d'utilisation par un guide d'ondes (tube de cuivre de section rectangulaire) couplé à la deuxième cavité.

Les électrons pénètrent dans la première ouverture avec une même vitesse v_0 ; l'application du signal à la première cavité fait qu'il existe au niveau de son ouverture un champ alternatif qui, suivant son sens, accélère ou ralentit les électrons dont la vitesse est ainsi « modulée » par le signal. Dans l'espace de glissement, les électrons (dont la vitesse a été modulée) tendent à se regrouper en paquets (les électrons accélérés rattrapant ceux qui ont été retardés dans la 1/2 période précédente). Le courant d'électrons dont la structure est devenue périodique par suite du regroupement périodique des électrons, passant la seconde ouverture, produit par influence un champ alternatif beaucoup plus grand que le champ appliqué ; cet effet est encore amplifié par la troisième cavité. L'énergie gagnée par ce procédé a été directement « empruntée » au faisceau continu émis par la cathode.

On réalise un tube oscillant « par lui-même », en remplaçant la seconde et la troisième cavité par une électrode spéciale portée à un potentiel négatif ; son but est de repousser les électrons qui ont franchi l'ouverture de la première cavité, pour les forcer à y repasser une nouvelle fois. Moyennant certaines conditions de potentiel, le tube ainsi formé oscille suivant des fréquences déterminées.

Bien d'autres tubes ont pu être construits qui font appel également à l'interaction d'un champ électrique ou magnétique et d'un faisceau d'électrons. On peut citer, par exemple : le tube à onde progressive (T.O.P.), à onde directe ou inverse, le magnétron dont l'invention permit aux Anglais en 1940 de créer les premiers radars réellement efficaces.

Les tubes à gaz

Un tube à gaz est un tube analogue à ceux que nous venons de décrire (triode, pentode), à ceci près qu'ils contiennent du gaz sous

une pression très réduite (environ 1/500 de la pression atmosphérique). Les collisions entre les électrons émis par la cathode et les atomes du gaz influent considérablement sur les caractéristiques électriques des tubes. Si les collisions sont suffisamment violentes, les atomes perdent un électron et deviennent des ions positifs. La charge d'espace ♦ qui existe dans le tube, dans les conditions normales, est neutralisée par ces ions et, par conséquent, cette barrière n'existant plus, de très fortes densités de courant peuvent être créées.

♦ Voir page 230.

Caractèristiques des tubes à gaz

On les classe en deux catégories :
— « tubes à cathode chaude » : la cathode est chauffée pour produire des électrons ;
— « tubes à cathode froide » : la production d'électrons est due soit au bombardement de la cathode par des ions, soit à l'action d'un champ électrique.

Utilisation des tubes à gaz

On utilise le plus souvent leur capacité à créer des courants de forte intensité pour des applications industrielles nécessitant des puissances très élevées : alimentations de fours, de machines tournantes, etc. On les utilise également, comme interrupteurs, pour la coupure de puissances importantes sous des différences de potentiel très élevées.

Effet photoélectrique : tubes sensibles à la lumière

Ce sont des tubes qui utilisent pour leur fonctionnement la variation de conductivité de certains matériaux quand ils sont soumis à la lumière visible, infrarouge ou ultra-violette. Le phénomène de la photoémission ♦, dont l'explication est donnée par la mécanique quantique ♦, réside dans le fait que les électrons des atomes soumis au rayonnement tendent à gagner des niveaux d'énergie plus élevés. Ils peuvent, de ce fait, se détacher plus facilement et leur mobilité est donc plus grande. L'application principale de ces tubes est la détection des rayonnements infrarouge, ultra-violet ou visible.

♦ Voir page 210.
♦ Voir pages 288 à 292.

Tubes émetteurs de lumière

Ce sont les tubes cathodiques des téléviseurs ou des oscilloscopes ♦, constitués d'un écran sur lequel sont déposées des milliers de sphères de matière phosphorescente d'un diamètre de 2 à 3 microns, qui, bombardées par des électrons de grande énergie, émettent de la lumière. La lumière dépend de la matière choisie, de la façon dont elle a été déposée et de la façon de réaliser le tube.

♦ Voir page 410.

Rappel des propriétés des corps semi-conducteurs : la diode à jonction

D'une façon générale, en électricité, les matériaux peuvent être classés suivant leur aptitude à conduire le courant électrique qui est mesurée soit par leur conductivité ♦, soit par son inverse, leur résistivité, c'est-à-dire suivant leur aptitude à conduire le courant électrique. Les isolants ne présentent pas de disponibilité pour la conduction, ce qui se traduit « macroscopiquement » par une résistivité — c'est-à-dire une inaptitude au passage d'un courant — de l'ordre de 10^{15} ohms × mètre ; les conducteurs, en revanche, ne présentent qu'une résistivité de 10^{-4} ohm × mètre. Entre les deux, les semi-conducteurs ont une résistivité comprise entre 10^{-3} et 10^{3} ohms × mètre ; isolants au zéro absolu, ils deviennent un peu conducteurs grâce à l'agitation thermique qui libère une certaine quantité d'électrons, aux températures ordinairement utilisées.

♦ Voir page 140

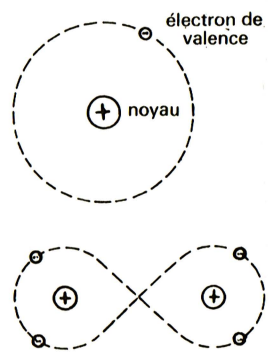
conducteurs	semi-conducteurs		isolants
10^{-6}	10^{-1}	10^{5}	10^{18}

← conductivité croissante
résistivité en Ω × cm

La conductivité étant proportionnelle au nombre d'électrons libres, ou plutôt aux électrons faiblement liés aux atomes, les conducteurs en ont beaucoup, les semi-conducteurs moins et les isolants très peu. Cependant, il y a moyen de modifier la conductivité des semi-conducteurs en y ajoutant des impuretés. Les semi-conducteurs utilisés ont généralement une résistivité de l'ordre de 2 ohms × cm.

Les semi-conducteurs ont une structure cristalline

Les atomes sont porteurs d'électrons répartis sur un certain nombre de couches ; les électrons sont d'autant moins liés au noyau de l'atome qu'ils s'en trouvent plus éloignés ; c'est, en particulier, le cas des électrons de valence ou électrons périphériques qui se trouvent sur la couche externe et qui peuvent s'en détacher facilement. Les atomes peuvent s'unir les uns aux autres : deux atomes semblables, en particulier, peuvent mettre en commun leurs électrons de valence pour former une liaison covalente.



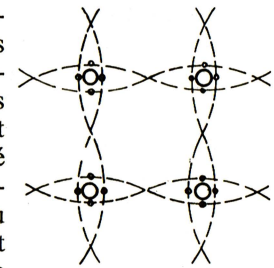
2 atomes liés par covalence

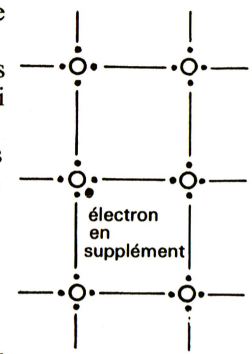
Dans un « réseau cristallin », les atomes sont organisés suivant un schéma géométrique et fortement reliés entre eux par covalence. Dans ces conditions, s'il y a peu d'électrons libres, la conductivité est faible. Si des atomes d'un autre corps dont le nombre d'électrons de valence est différent de celui des atomes du semi-conducteur — par exemple, supérieur à lui — sont introduits dans le réseau, des liaisons covalentes vont aussi s'établir entre les atomes, mais tous les électrons n'y participeront pas. Les électrons en trop ne pouvant être liés en permanence aux atomes voisins par covalence peuvent s'en libérer sous l'action d'une excitation assez faible (élévation de température ou champ électrique...).

L'introduction des atomes étrangers ou impuretés dans le semi-conducteur est appelée « dopage » ; il suffit de très peu d'impuretés pour modifier considérablement les propriétés électriques du semi-conducteur. On peut doper un semi-conducteur par un excès d'électrons (l'atome étranger est appelé donneur) ou par un défaut (l'atome introduit est un accepteur). Dans ce dernier cas, on a créé une « lacune », c'est-à-dire qu'au lieu d'avoir un électron supplémentaire, c'est une place — un trou — qui existe dans le réseau et qui peut être comblé par un électron voisin : les trous peuvent donc se déplacer, tout comme les électrons. L'électron portant une charge négative, le trou ou absence d'électron est l'équivalent d'une charge positive.

Le semi-conducteur, dopé par des impuretés donnant des électrons supplémentaires, est dit du type *n* ; quand ce sont des lacunes qui sont créées, il est dit du type *p*.

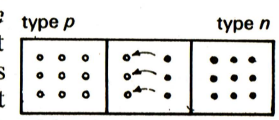
Les semi-conducteurs *p* ou *n* ont néanmoins autant de charges positives que de charges négatives et, globalement, ils restent électriquement neutres (puisque chacun des atomes, pris séparément, est neutre).





Jonction p-n

Si l'on réunit deux semi-conducteurs, l'un de type *p*, l'autre de type *n*, on réalise une jonction. Certains électrons libres de la région *n* tendent à venir combler les vides qui existent dans la région *p*, et réciproquement ; les trous (charges positives fictives) sont attirés par les électrons. Ce processus tend nécessairement vers un état d'équilibre qui est réalisé par la formation de ce que l'on appelle une charge d'espace ♦, dans une région entourant la jonction appelée région de transition.



♦ Voir page 230.

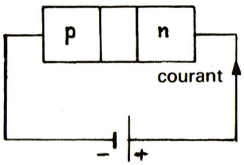
La région *p*, s'étant appauvrie en trous, est devenue légèrement négative (puisqu'elle était neutre au départ), empêchant ainsi les électrons de la région *n* de parvenir jusqu'à elle ; il en va de même, mais symétriquement, pour la région *n*. Sous l'effet de l'énergie d'agitation thermique, les porteurs de charges (électrons et trous) tendent à diffuser à travers la jonction, donnant naissance à un courant de diffusion et, par conséquent, à une différence de potentiel (ou gradient ♦ de potentiel) à travers la région de charge d'espace. Corrélativement, l'apparition de cette différence de potentiel appliquée aux porteurs de charges crée un courant, courant de saturation, en sens inverse. Dans les conditions d'équilibre, les courants de diffusion et de saturation sont égaux et, par conséquent, le courant total traversant la jonction est nul.

♦ Gradient : voir Aperçu mathématique, page 18.

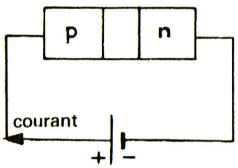
On peut donc dire que le gradient de potentiel forme une barrière d'énergie entre les deux matériaux, qui restent ainsi isolés l'un de l'autre avec leurs propriétés propres. L'équilibre de la jonction

p-n peut être rompu dès lors que l'on agit sur la barrière de potentiel qui sépare les deux régions *p* et *n* ; pour cela, il suffit de brancher entre elles une source électrique (pile ou batterie). Le comportement de la jonction varie avec le sens de la différence de potentiel appliquée.

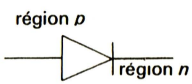
Si la borne positive de la batterie est reliée à la région *n* et la borne négative à la région *p*, les électrons de la partie *n* tendent à s'écarter de la jonction pour joindre le pôle positif de la batterie, de même les trous de la région *p* sont attirés par le pôle négatif. De cela il résulte que la charge d'espace qui était confinée à la jonction tend à occuper la « place » qu'on lui libère, et l'on va vers un équilibre tel que le gradient de potentiel augmente jusqu'à approcher la valeur de la différence du potentiel appliquée. Dans ces conditions, on dit que la jonction est polarisée en sens inverse, le courant qui circule dans le circuit est très faible.



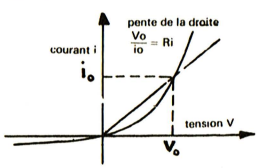
Si on inverse le sens du branchement, c'est-à-dire que l'on relie la borne positive à la région *p* et la borne négative à la région *n*, les électrons de la région *p* brisant leurs liaisons de valence et donnant naissance à de nouveaux trous sont attirés par le pôle positif de la batterie. En même temps, des électrons issus du pôle négatif de la batterie entrent dans la région *n* et diffusent vers la jonction. De sorte que la région de charge d'espace tend à devenir de plus en plus étroite et que le gradient de potentiel devient de plus en plus petit. Les électrons en excès dans la région *n*, où ils ne peuvent rester liés, traversent plus facilement la barrière de potentiel, pénètrent dans la région *p* où ils comblent les lacunes laissées dans le matériau *p* par les électrons captés par le pôle positif. A leur tour, ils subissent l'attraction du pôle positif, ils brisent leurs liaisons pour émigrer vers celui-ci. Le processus continuant ainsi, le circuit est traversé par un courant qui est d'autant plus grand que le potentiel appliqué est plus important, et qui dure tant que la batterie reste branchée, c'est-à-dire tant que le circuit est fermé. Dans le cas qui vient d'être traité, la jonction est dite polarisée dans le sens direct.



Une jonction *p-n* polarisée dans le sens direct laisse donc passer dans le circuit un courant important, et un courant très faible quand elle est polarisée dans le sens inverse. Elle est donc l'équivalent de la diode (on l'appelle diode à jonction) que nous avons étudiée dans le paragraphe consacré aux tubes à vide, et est représentée symboliquement par le schéma ci-contre.

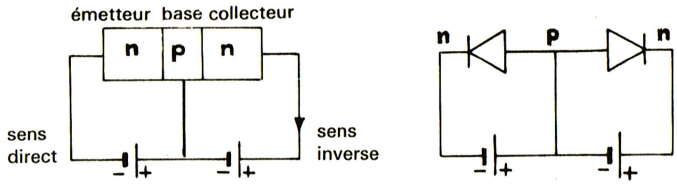


Par analogie avec le tube électronique, la région *n* est appelée cathode et la région *p* anode ; la courbe caractéristique (courbe donnant le courant traversant le circuit en fonction de la tension appliquée) est équivalente à celle du tube. Dans le sens direct, la résistance de la diode, rapport du courant à la tension appliquée, est faible, dans le sens inverse, elle est très importante.



Structures p-n-p et n-p-n : le transistor

On réalise un transistor en groupant des semi-conducteurs du type *n* et du type *p*, de façon à réaliser deux jonctions en série : la région *p* est comprise entre deux régions *n* ou vice-versa. L'une des jonctions est polarisée dans le sens direct, l'autre dans le sens inverse.



La jonction de gauche étant polarisée dans le sens direct est traversée par un courant important, sa résistance est faible, tandis que la jonction polarisée dans le sens inverse a une résistance élevée et, si elle était seule, elle serait traversée par un faible courant. Mais la région *p* séparant les deux jonctions est suffisamment fine pour que la plus grande partie (entre 90 % et 95 %) des électrons issus de la région de gauche puisse diffuser à travers elle et gagner la région de droite. Si l'on se rappelle ♦ que la puissance dans un élément de circuit est égale au produit du courant dans l'élément par la différence de potentiel qui existe aux bornes de cet élément, on réalise un gain de puissance en augmentant le courant du circuit, pour la même différence de potentiel. C'est ce qui se produit dans un transistor : le courant supplémentaire, issu de la région de gauche, circulant dans la région polarisée en inverse (c'est-à-dire dont la résistance est grande), entraîne un gain en puissance.

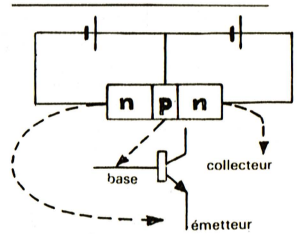
On réalise de cette façon un élément amplificateur, analogue dans ses fonctions à une triode ♦.

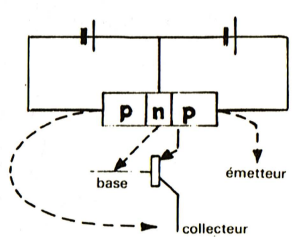
Les transistors, suivant qu'ils ont une structure *p-n-p* ou une structure *n-p-n*, sont représentés symboliquement par les schémas ci-contre. Dans un transistor *n-p-n*, la partie *n* à gauche, qui fournit les électrons, s'appelle l'émetteur, la partie *p*, au centre, s'appelle la base, et la partie *n*, à droite, s'appelle le collecteur.

♦ C'est une des lois fondamentales de l'électricité : si on applique une différence de potentiel V aux bornes d'un circuit et si l'intensité du courant qui le traverse est I, la puissance fournie à ce circuit est :

$$\underset{\text{(watts)}}{P} = \underset{\text{(volts)}}{V} \times \underset{\text{(ampères)}}{I}$$

♦ Voir page 232.





Autres types de composants à semi-conducteurs

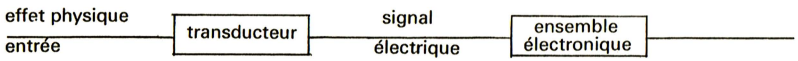
Il existe à l'heure actuelle un grand nombre d'éléments à semi-conducteurs qui ont des propriétés remarquables, mais dont les mécanismes de fonctionnement sont très complexes et parfois encore mal compris. Ces nouveaux éléments prennent une place de plus en plus importante dans les applications de l'électronique, tant aux basses fréquences qu'aux hyperfréquences, et commencent à pénétrer certains domaines où, jusqu'ici, seule l'utilisation des tubes électroniques était envisagée.

On peut citer :
— la diode tunnel, qui peut servir à l'amplification, la génération d'impulsions ;
— les transistors à effet de champ et les transistors « unijonction », fonctionnant d'une façon un peu différente des transistors classiques, se substituent à ceux-ci dans certaines applications ;
— les thyristors, qui ont des caractéristiques équivalentes à celles des tubes à gaz ♦ (thyratrons) ;
— les diodes ATT, IMPATT, PIN, GUNN, les varactors, etc., dont les applications en hyperfréquences sont extrêmement intéressantes.

♦ Voir page 234.

NOTION DE CIRCUIT ÉLECTRONIQUE

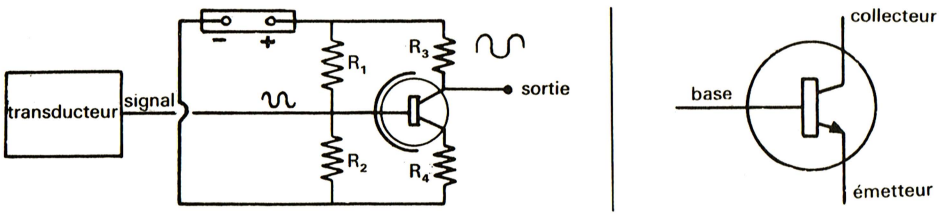
Reprenons le schéma d'une « chaîne fonctionnelle » :



Nous disposons à la sortie d'un transducteur d'un signal électrique qui doit le plus souvent, pour être utilisable, être traité ; le rôle de l'ensemble électronique interposé entre le transducteur et l'utilisateur est précisément de réaliser le traitement de ce signal. Plus le traitement envisagé est complexe, plus il faudra réaliser de fonctions (modulations, amplification, etc.) et plus il faudra réaliser de circuits (nous rappelons qu'un circuit est une association d'éléments actifs et passifs, que l'on nomme aussi composants discrets, reliés entre eux de façon à réaliser une fonction bien précise ou une partie de celle-ci ♦).

♦ Aux fréquences suffisamment basses, les éléments passifs sont bien distincts et localisés (existent sous une forme discrète, au sens de la mathématique) dans le circuit : capacités, self-inductances ; on les appelle composants discrets. Aux fréquences élevées (U.H.F., par exemple), il n'est plus possible de faire la distinction entre les éléments, d'isoler tel ou tel d'entre eux, car ils sont liés indissolublement au circuit ; on préfère parler dans ce cas de circuits à constantes réparties.

Supposons que l'on cherche à amplifier le signal électrique issu du transducteur. Pour cela, nous devons utiliser un élément actif capable d'amplifier, un transistor du type *n-p-n*, par exemple ; pour que ce transistor fonctionne correctement, il est nécessaire de lui adjoindre des résistances (éléments passifs) ; le schéma de l'amplificateur pourra être le suivant :



Le signal à amplifier est appliqué sur la base du transistor ; par suite de la propriété qu'a le transistor d'amplifier les courants, il circule dans la base un petit courant et dans le collecteur un courant qui est des dizaines, voire des centaines de fois supérieur au courant circulant

dans la base. En réglant convenablement la valeur des résistances placées dans le circuit, on obtient au collecteur un signal semblable à celui appliqué sur la base, mais beaucoup plus grand. On a donc bien réalisé une amplification et le circuit que nous venons de décrire est un amplificateur.

Technologie des circuits et leur évolution

Le désir des clients d'obtenir des matériels moins encombrants, allié à l'amélioration des techniques de fabrication des éléments de base ou composants discrets et à quelques « astuces » de câblage, a conduit les fabricants de matériels électroniques — et ce, même avant l'apparition des transistors — à réduire le volume des circuits.

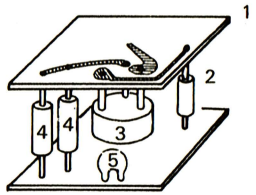
Câblage imprimé

Les éléments d'un circuit doivent être reliés entre eux par des fils conducteurs : c'est ce que l'on appelle le câblage du circuit. Cette opération étant parfois fort longue et délicate, on réalisa un important progrès technologique lorsqu'on imagina, afin de réduire le temps de fabrication tout en augmentant la qualité du produit, de réaliser le câblage du circuit en une seule fois, suivant la technique du câblage imprimé.
Pour cela, on utilise une plaquette de matière isolante recouverte d'une faible couche de cuivre. On dessine à l'aide d'une encre spéciale le réseau des connexions que l'on désire réaliser, en marquant par une petite tache les endroits où les extrémités des composants discrets seront fixées. On plonge la plaquette portant le dessin dans une solution acide afin d'éliminer tout le cuivre qui n'est pas recouvert par de l'encre, et on obtient ainsi le câblage. Il suffit alors d'éliminer l'encre qui recouvre le réseau des connexions et de souder les éléments du circuit aux endroits prévus ♦

♦ On peut (éventuellement) établir une analogie avec la méthode des graveurs ou rappeler les classes enfantines : réalisation de pochoirs.

Montage fagot

Pour diminuer encore le volume des circuits, on décida de monter les éléments côte à côte, comme l'on fait lorsqu'on réalise un fagot à l'aide de branchages, d'où le nom de « montage fagot » donné à ce circuit. Les extrémités des composants sont reliées à deux circuits imprimés de façon à réaliser les connexions nécessaires.



1. Plaquette portant le cablage imprimé
2. Diode
3. Transistor
4. Résistances
5. Condensateur

Circuits imprimés ; microélectronique ; intégration à grande échelle

L'étape suivante fut de réaliser des circuits où non seulement le câblage était imprimé sur une plaquette, mais également certains éléments passifs comme les résistances, les autres éléments, en parti-

culier les éléments actifs (diodes, transistors), étant rapportés. Le progrès technologique aidant, les dimensions des plaquettes et des éléments se trouvèrent être encore réduits, d'où la naissance de ce que les techniciens ont appelé la « microélectronique hybride » (hybride, parce que l'on est encore obligé de rapporter certains éléments). Enfin, la dernière étape a été ce que l'on appelle l'intégration monolithique (circuits intégrés) : tous les composants actifs ou passifs sont produits simultanément au cours d'un processus unique et réalisés à une échelle extrêmement faible ♦ sur un substrat de semi-conducteur.

♦ C'est ainsi que, sur une « puce » de silicium de quelques millimètres carrés de surface, on arrive à placer 500 composants ; cela constitue un exemple de ce que l'on appelle l'intégration à grande échelle (en anglais : L.S.I. ou « Large Scale Integration »).

Circuits logiques

Il existe une catégorie de circuits qui, bien que formés des mêmes éléments de base que les autres circuits de l'électronique — et donc très susceptibles d'être réalisés de façon similaire en microélectronique — ont acquis une très grande importance par suite de leur emploi systématique, en quantités énormes, dans les machines à calculer (ordinateurs) : ce sont les circuits logiques. On peut même dire que les industriels désirant réduire la taille des machines à calculer et augmenter leurs performances par l'amélioration de leurs circuits ont poussé les recherches dans le sens de l'intégration, recherches qui ont conduit aux circuits intégrés actuels.

Dans un système digital ♦, fût-il de grandes dimensions, comme les machines à calculer arithmétiques ou les systèmes de télécommunications qui utilisent les techniques digitales, seul un petit nombre d'opérations de base doivent être effectuées, même si elles sont répétées un très grand nombre de fois. Les circuits qui réalisent ces opérations sont les circuits ET, OU, NON et le circuit bistable (c'est-à-dire possédant deux états stables). On appelle ces circuits, circuits logiques, car ils servent à réaliser physiquement des équations algébriques booléennes ♦

♦ Voir page 220.

♦ Cette algèbre fut inventée au siècle dernier par le mathématicien G. Boole pour traiter mathématiquement les problèmes de logique.

Circuit logique OU

Soient N grandeurs A, B, C, D..., N, ne pouvant prendre que deux valeurs 0 et 1, c'est-à-dire ne pouvant être que dans l'état 0 ou l'état 1 ; soit également une grandeur Y, définie de la façon suivante :
Y vaut 1 (c'est-à-dire dans l'état 1), si l'*une quelconque* des grandeurs A, B, C..., N est égale à 1.

$$Y = 1 \begin{cases} A = 1, \quad B = 0, \quad C = 0\ldots, \quad N = 0 \\ A = 0, \quad B = 1, \quad C = 0\ldots, \quad N = 0 \\ A = 0, \quad B = 0, \quad C = 1\ldots, \quad N = 0 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ A = 0, \quad B = 0, \quad C = 0\ldots, \quad N = 1 \end{cases}$$

et aussi :

$$Y = 1 \begin{cases} A = 1, \quad B = 1, \quad C = 0 \ldots, \quad N = 0 \\ A = 1, \quad B = 0, \quad C = 1 \\ \text{etc.} \end{cases}$$

Y vaut 0 (c'est-à-dire Y est dans l'état 0), si *toutes* les grandeurs A, B..., N sont égales à 0.

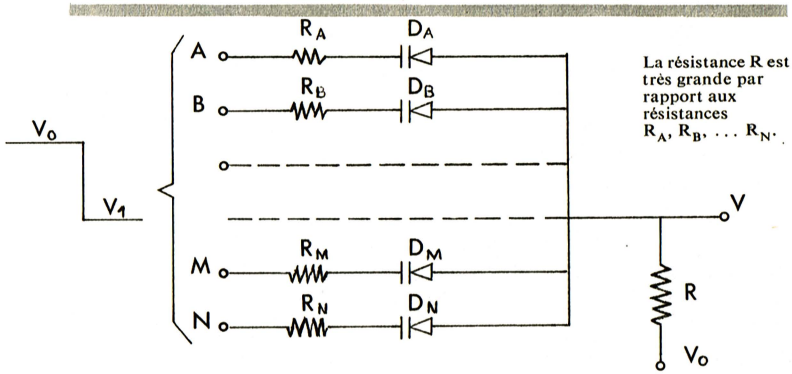
On dit que Y est lié à A, B, C, D..., N par une relation logique OU au sens de l'algèbre de Boole, et l'on exprime cela sous la forme suivante : Y = A ou B ou C ou D ou ... ou N, que l'on écrit symboliquement : $Y = A \oplus B \oplus C \oplus D \oplus \ldots \oplus N$.

Voyons maintenant comment peut être réalisée à l'aide d'un circuit l'équation booléenne précédente.

Il y a plusieurs façons de réaliser le schéma d'un circuit logique OU : ce peut être une combinaison de diodes et de résistances (logiques à diodes), ou de transistors et de résistances (logiques T.T.L. ♦).

♦ T.T.L., pour Transistor Transistor Logic.

Nous étudierons le fonctionnement d'un circuit OU à N entrées réalisé avec des diodes et des résistances ; le schéma en est le suivant :



A chaque entrée A, B, N peut être appliquée une tension ; v_A en A, v_B en B, etc. La tension appliquée ne peut prendre que deux valeurs, V_0 et V_1 ; V_0 ayant une valeur nulle, on dira par pure convention qu'elle correspond à l'état zéro, noté 0. V_1 est une tension négative, on dira qu'elle représente l'état un, noté 1. Remarquons que l'on aurait aussi bien pu prendre la convention contraire (V_1 étant l'état zéro et V_0 l'état un).

Si toutes les entrées sont égales à V_0 (état 0), les diodes D_A, D_B, etc., ne laissent passer aucun courant et, le courant dans R étant nul, le potentiel du point Y est égal à V_0. Y prend donc la valeur V_0, c'est-à-dire est à l'état 0. Donc : $Y = 0$ si $A = B = C = \ldots N = 0$.

Si une entrée, A par exemple, est dans l'état 1, les autres étant dans l'état zéro, la diode D_A conduit, Y est pratiquement égal à V_1 et donc dans l'état 1. On a donc réalisé la relation :

$Y = 1$ si $A = 1, \quad B = C = D = \ldots = N = 0$.

On aurait, de même :

$Y = 1 ; \quad A = 0 ; \quad B = 1 ; \quad C = D = \ldots = N = 0$, etc.

Le circuit résout donc l'équation logique :

$Y = A \oplus B \oplus C \oplus \ldots \oplus N$.

Circuit logique ET

Un circuit ET réalisé de façon analogue résoudrait : Y = A et B et C et ... et N, noté symboliquement : $Y = A \wedge B \wedge C \ldots \wedge N$, c'est-à-dire Y = 1 si A et B et ... et N sont égaux à 1.

Circuit logique NI ou NON-OU

Ce circuit très important permet de réaliser toutes les fonctions logiques. Il répond à l'équation :

$Y = \overline{A \oplus B \oplus C \oplus \ldots \oplus N}$.

Le tiret sur une lettre ou sur un ensemble de lettres signifie NON, c'est-à-dire que Y est le contraire de $A \oplus B \oplus C \oplus \ldots \oplus N$, ou encore que Y prend la valeur 0 (état zéro), quand $A \oplus B \oplus C \oplus \ldots \oplus N$ vaut 1 (état 1). Les lois de De Morgan (lois de l'algèbre de Boole) permettent d'écrire la relation importante :

$A \oplus B \oplus \ldots \oplus N = \overline{A} \wedge \overline{B} \wedge \overline{C} \wedge \ldots \wedge \overline{N}$.

SYSTÈMES ÉLECTRONIQUES

Dans les rubriques qui précédent, l'électronique a été présentée sous son double aspect d'étude des phénomènes électroniques, d'une part, et, d'autre part, de technique utilisant ces mêmes phénomènes. Cette dualité que l'on trouve constamment en électronique (science en évolution constante) pourrait d'ailleurs fort bien être utilisée pour illustrer la notion bien connue d'accélération du progrès et tout particulièrement dans le cas des composants à semi-conducteurs où les découvertes les plus récentes faites en physique du solide trouvent souvent une application technologique immédiate donnant naissance à des composants électroniques nouveaux et, partant, à des applications insoupçonnées jusque-là.

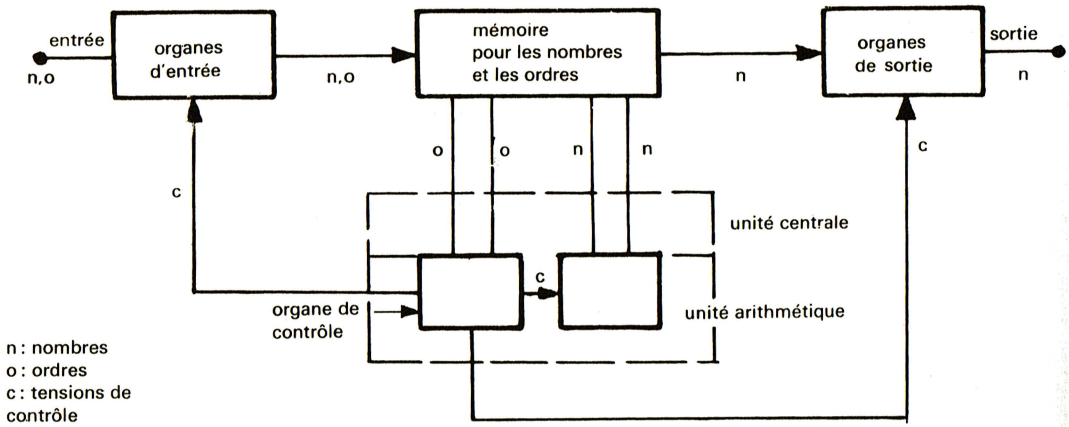
Sous son aspect technique, nous avons dit que l'électronique était attachée tout particulièrement à la génération, au transport et surtout au traitement d'informations. Cette façon de présenter les choses peut paraître un peu arbitraire, mais il faut bien reconnaître que c'est dans ce domaine, où elle est irremplaçable, qu'elle a apporté une contribution décisive. A notre époque, les besoins de traitement de l'information, qu'ils soient à l'échelon du pays, de l'entreprise, voir du simple particulier, exigent de plus en plus le recours aux techniques et aux matériels de l'électronique. Sans une science électronique élaborée, beaucoup de réalisations dont peuvent s'enorgueillir les pays modernes n'auraient pu aboutir, et peut-être n'auraient jamais été envisagées. Le dépouillement et le traitement des données de toutes natures : échantillons statistiques, élections, stocks de marchandises, transmission simultanée sur toute la Terre d'un programme mondial de télévision par le moyen de satellites artificiels, le contrôle d'usines entières et de processus aussi complexes que le contrôle du vol d'une capsule spatiale nécessitent de très puissants moyens (calculatrices de grande capacité, stations de réception équipées de radars...).

Même en se plaçant au niveau plus modeste du simple citoyen, nous employons et nous dépendons, dans notre vie courante, d'une quantité toujours plus grande de systèmes à base d'électronique ou employant l'électronique. Sans parler d'objets aussi familiers que les systèmes audio-visuels, postes de radio ou de télévision, magnétophones, etc., citons les applications de l'électronique au contrôle de la carburation des moteurs de voitures, à leur freinage et peut-être bientôt à leur guidage. Déjà, dans le commerce, on propose à la ménagère des fours à hyperfréquences qui cuisent le rôti au rythme des ondes radars, et les revues spécialisées annoncent même l'avènement de l'ordinateur chez soi et des « visiophones » chers aux auteurs de science-fiction.

Pour clore cet article, où nous nous sommes efforcés, sans peut-être y parvenir, de donner une idée de ce qu'est l'électronique, il nous a semblé intéressant et nécessaire de présenter quelques-uns de ces systèmes électroniques complexes si caractéristiques de la place que prend cette technique dans le monde moderne. Nous décrirons donc successivement, quoique d'une manière succincte, l'architecture d'un calculateur arithmétique, ou « ordinateur », d'un radar et d'une chaîne de radionavigation.

Structure d'une machine à calculer arithmétique, ou ordinateur

Une machine à calculer arithmétique digitale est un système qui traite et emmagasine une grande quantité d'informations et qui effectue des calculs scientifiques d'une grande complexité à une très grande vitesse, très largement supérieure à celle de n'importe quel calculateur humain. D'où son emploi quasi général dans toutes les branches de l'activité humaine où il faut pouvoir traiter de nombreuses informations et fournir rapidement des résultats : calcul de la paie dans les entreprises, gestion des comptes bancaires, recherches d'informations, mises en mémoire, conduite de machines...
La machine à calculer (ou l'ordinateur) réalise donc des calculs numériques suivant des instructions qui lui ont été fournies, mais elle n'est pas capable de définir elle-même son programme de calcul. Schématiquement, un ordinateur est constitué de la façon suivante : à l'entrée du calculateur (dans les organes d'entrée) sont introduites les instructions constituant le programme du calcul que l'on désire faire exécuter par la machine ; ces instructions sont traduites, sur des cartes perforées, en un certain code compris par la machine qui, alors, lit les instructions et les met en mémoire. Cette opération est dirigée par un organe de contrôle dont le rôle est extrêmement important, puisque sa fonction est d'interpréter les instructions ; c'est-à-dire qu'il règle la circulation des nombres et des instructions et dirige l'exécution des opérations et l'impression des résultats en



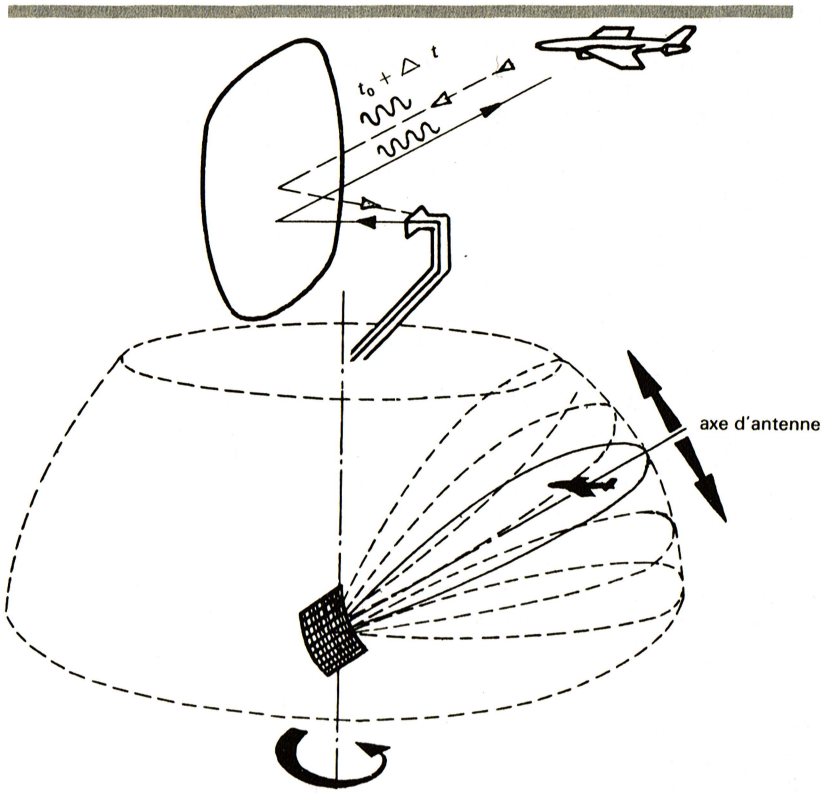
contrôlant les organes de sorties. Les opérations de l'arithmétique : addition, soustraction, etc., sont réalisées par les circuits électroniques contenus dans l'unité arithmétique. L'ensemble des organes de contrôle et de calcul constitue l'unité centrale du calculateur.

Hardware et software

On désigne par le mot anglais de « hardware » la partie du calculateur qui a une existence physique : la mémoire, l'unité arithmétique, etc., et par le mot « software » les programmes qui, emmagasinés dans le calculateur, lui appartiennent en propre et sont exécutés automatiquement dès que l'on fait appel à eux.
Une certaine capacité de calcul par un ordinateur donné peut ainsi être réalisée soit par le hardware seul, soit par une combinaison de hardware et de software. Par exemple, la capacité à calculer une racine carrée peut être obtenue en ajoutant un équipement supplémentaire (hardware) répondant à une instruction : « extraction de racine carrée », ou bien par un programme interne appelé aussi « subroutine », qui, utilisant l'équipement existant, calcule la racine carrée. C'est ainsi qu'avec un hardware relativement limité on peut arriver à réaliser des opérations assez complexes ; le choix du « dosage » hardware/software dépend de facteurs aussi variés que le coût de la machine et de sa mise en œuvre, de la vitesse, de la facilité de la maintenance et de la souplesse que l'on désire.

Radar

Le mot « radar », qui provient de la contraction de l'expression anglaise « RAdio Detection And Ranging », désigne un système de détection qui, par le moyen d'ondes électromagnétiques, détermine



la direction et la distance par rapport à lui-même des objets observés (avions, bateaux, etc.).

Le fonctionnement d'un radar peut être présenté de la façon suivante, dans le cas d'un radar à impulsions.

Un puissant émetteur rayonne à l'instant t_0, dans la portion de l'espace balayée par une antenne dont on dit qu'elle est directive, des ondes électromagnétiques à haute fréquence sous forme d'impulsions de très courte durée. Si dans la portion d'espace limitée par le rayonnement de l'antenne se trouve un objet, celui-ci, réfléchissant dans toutes les directions l'énergie qu'il intercepte, renvoie une très faible partie de celle-ci dans la direction du radar et donne naissance à l'instant $t_0 + \Delta t$, dans le récepteur du radar, à un signal qui est l'écho de l'objet.

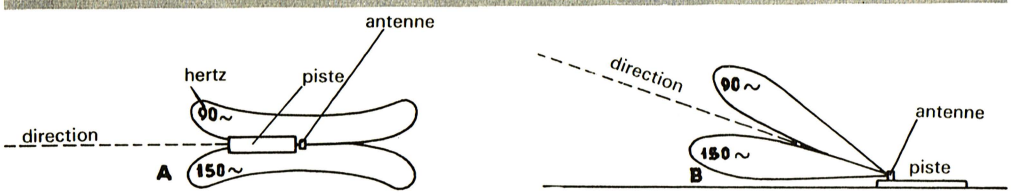
L'intervalle de temps Δt (durée du trajet radar-objet-radar parcouru par les ondes à la vitesse de la lumière), mesuré avec précision, permet d'obtenir la distance qui sépare l'objet du radar.

D'autre part, la direction du but est déterminée par la direction de l'axe de l'antenne, au moment où l'on reçoit l'écho.

Radionavigation et radioguidage

D'une façon générale, les avions et les bateaux, pour l'efficacité de leur navigation dans un trafic de plus en plus dense et la sécurité de leur arrivée à l'aérodrome ou au port quelles que soient les conditions atmosphériques, utilisent des aides à la navigation et au guidage. En ce domaine, il existe une grande variété de systèmes qui, d'ailleurs, peuvent équiper simultanément le même avion ou le même bateau, suivant l'utilisation projetée et les difficultés particulières qui en résultent, car la navigation à longue ou à courte distance, par exemple, ne se résout pas de la même façon dans les deux cas. Néanmoins, du fait que les bateaux et les avions sont amenés à se déplacer sur de grandes étendues, les systèmes nécessitant une coopération entre le mobile et des stations au sol se doivent d'observer une certaine « standardisation » à l'échelon international. Il n'est pas dans nos intentions de décrire particulièrement tel ou tel système en détail ni d'en dresser un catalogue ; nous nous contenterons de fournir quelques illustrations de procédés de radionavigation et de radioguidage permettant de saisir de façon intuitive ce que recouvrent ces deux vocables.

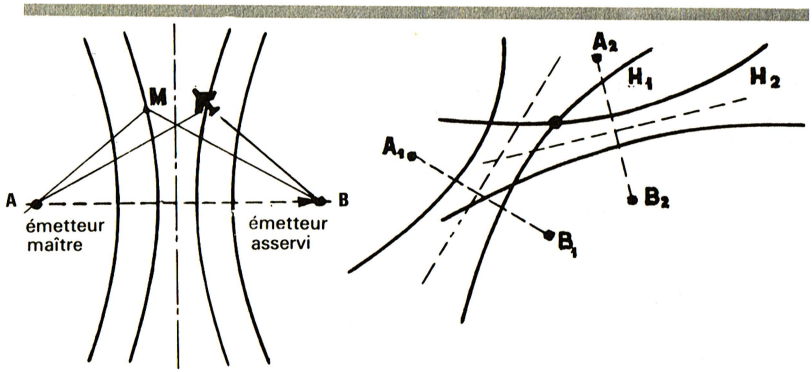
Système I.L.S. (« Instrument Low Approach System »)



Un avion se préparant à atterrir connaît en permanence sa situation par rapport à la ligne idéale d'approche qui est matérialisée au sol par des diagrammes de rayonnement d'antenne. Pour être dans la bonne direction, l'avion doit recevoir autant de signaux à 90 Hz qu'à 150 Hz. Un récepteur de bord indique instantanément au pilote s'il est trop haut ou trop bas, à gauche ou à droite de la ligne idéale de descente.

Système Loran (« Long Range Navigation »)

Pour la navigation à longue distance des avions, divers systèmes ont été mis au point ; un des plus utilisés est le système Loran. Le principe en est simple : considérons deux émetteurs A, émetteur maître, et B, émetteur asservi. A émet des impulsions (34 impulsions de 45 microsecondes répétées 20 à 34 fois par seconde) qui sont répétées par B. Suivant la position où l'on se trouve, par exemple au point M, on recevra les émissions avec un certain décalage dans



le temps, dû à la différence des chemins parcourus par les ondes. On sait que le lieu des points pour lequel ce décalage a une certaine valeur ΔT_1 est une hyperbole de foyers A et B et telle que MB — MA $= c\Delta T_1$ (c étant la vitesse des ondes).

Pour connaître la position de son avion, le navigateur repère un couple de stations maître-esclave ; il détermine ainsi l'hyperbole sur laquelle se trouve l'avion. Il répète cette opération avec un autre couple d'émetteurs, d'où une nouvelle hyperbole. L'intersection des 2 hyperboles lui fixe la position de l'avion.

Pierre Prétet et René Launay.

ÉLECTRON-VOLT (Electron-volt) page 352.

Unité d'énergie utilisée en physique nucléaire ♦.
Elle correspond à l'énergie communiquée à une charge de 1 électron subissant une différence de potentiel de 1 volt. Un électron-volt vaut $1{,}6.10^{-19}$ joule.
L'habitude est prise de caractériser des accélérateurs par l'énergie qu'ils peuvent communiquer aux particules. On parle ainsi d'un synchrotron à protons de 30 G*e*V ♦.
On exprime aussi quelquefois la masse des particules en électrons-volts conformément à la relation d'Einstein : la masse de l'électron est de $0{,}51.10^{6}$ *e*V.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

♦ 30 G*e*V : 30 giga-électrons-volts, soit 30 000 millions d'électrons-volts.

ÉLECTROSTATIQUE (Electrostatics) pages 145, 183, 184, 196, 208, 232, 257, 326, 343, 535.

Étude des charges électriques en équilibre.
Dans ce cas, le champ créé par les charges se réduit au champ électrique (seule une charge en mouvement crée un champ magnétique). Cette partie de l'électricité a été la première étudiée. Elle trouve aujourd'hui, grâce à des générateurs électrostatiques modernes, des applications intéressantes pour la recherche (accélérateurs Van de Graaf) et pour la vie pratique : fixation électrostatique de pièces isolantes et peinture électrostatique, par exemple ♦.
L'électrostatique est l'électricité des tensions très élevées et des intensités très faibles.

♦ Le procédé consiste à charger électriquement la pièce à peindre, une grille par exemple : la peinture pulvérisée est attirée par la pièce chargée. On comprend que dans ces conditions on réalise une économie de peinture.

ÉLÉMENT (Element) pages 228, 229, 240, 241, 254, 257, 259, 273, 305, 313, 314, 324, 326, 340, 351, 354, 355, 356, 411, 412, 445, 451, 478, 491, 493, 501, 503, 507, 511, 512, 522, 529.

« Partie commune à un corps simple et à ses composés. »
Cette définition montre bien ce qu'on entend lorsqu'on parle de l'élément carbone, par exemple : c'est l'atome de carbone, commun au graphite, au diamant, et aux milliers de corps organiques contenant du carbone. Les propriétés de l'élément sont donc des propriétés atomiques.
Comment distinguer l'atome et l'élément ? Nous savons que l'atome est caractérisé par son nombre de masse A et son nombre de charge, ou numéro atomique, Z ♦, ce dernier conditionnant ses propriétés chimiques. L'élément carbone, de propriétés chimiques déterminées, pourra contenir des atomes de masses différentes $^{12}_{6}C$ et $^{14}_{6}C$, qui sont des isotopes. On peut donc définir un élément comme l'ensemble des atomes occupant une case donnée de la classification périodique.

♦ Pour la suite de cet article, se reporter à l'Atome, pages 41 à 45.

ÉLÉMENTS RADIOACTIFS (Radioactive elements) pages 275, 520.

Le noyau d'un atome est plus ou moins stable. En première approximation, la stabilité correspond à un nombre de protons sensiblement égal au nombre des neutrons. Si cette condition n'est pas réalisée, le noyau tendra vers un état stable par radioactivité. C'est le cas des transuraniens.

ÉLÉMENTS DE TRANSITION (Transition elements) pages 207, 211.

Les électrons d'un atome sont caractérisés par quatre nombres quantiques :
— n : nombre quantique principal, caractérisant la couche sur laquelle se trouve l'électron. $n = 1$ correspond à la couche la plus proche du noyau (couche K).
— l : nombre quantique secondaire, pouvant prendre, pour une valeur de n donnée, les valeurs entières de 0 à $n - 1$, soit n possibilités.

Chaque valeur de l définit une sous-couche :
$l = 0$ correspond à la sous-couche s,
$l = 1$ correspond à la sous-couche p,
$l = 2$ correspond à la sous-couche d,
$l = 3$ correspond à la sous-couche f,
$l = 4$ correspond à la sous-couche y, etc.
— m : nombre quantique magnétique, pouvant prendre les valeurs de $-l$ à $+l$ (y compris 0), soit $2n - 1$ possibilités.
— s : nombre quantique de spin, pouvant prendre des valeurs $+\frac{1}{2}$ ou $-\frac{1}{2}$.

Lorsque n, l, m sont fixés, on ne peut plus trouver que deux électrons, différant par leur spin ♦. Les couches s'organisent donc ainsi :

couche K : $n = 1$ $l = 0$ $m = 0$ 2 électrons (électrons $1s$ ♦)

couche L : $n = 2$ $l = 0$ $m = 0$ 2 électrons (électrons $2s$)

$l = 1 \begin{cases} m = -1 \\ m = 0 \\ m = +1 \end{cases}$ 6 électrons (électrons $2p$)

couche M : $n = 3$ $l = 0$ $m = 0$ 2 électrons (électrons $3s$)

$l = 1 \begin{cases} m = -1 \\ m = 0 \\ m = +1 \end{cases}$ 6 électrons (électrons $3p$)

$l = 2 \begin{cases} m = -2 \\ m = -1 \\ m = 0 \\ m = +1 \\ m = +2 \end{cases}$ 10 électrons (électrons $3d$)

couche N : $n = 4$ $l = 0$ 2 électr. (électrons $4s$)
$l = 1$ $m = -1, 0, +1$ 6 électr. (électrons $4p$)
$l = 2$ $m = -2, -1, 0, +1, +2$ 10 électr. (électrons $4d$)
$l = 3$ $m = -3, \ldots 0, \ldots +3$ 18 électr. (électrons $4f$)
etc.

Chaque couche et sous-couche correspond à une énergie de liaison de l'électron au noyau bien déterminée. Pour les premières couches, les niveaux sont suffisamment distincts, et aucun problème ne se pose : le remplissage des niveaux se fait dans un ordre simple : $1s$, puis $2s$, $2p$.
Au fur et à mesure que le nombre d'électrons autour du noyau augmente, on doit recourir à des niveaux dont les énergies sont de plus en plus voisines, et il se trouve que le niveau $3d$, par exemple, correspond à une énergie plus élevée que le niveau $4s$. C'est donc ce dernier qui se remplira d'abord.
Nous aurons alors des éléments dont la couche externe comporte déjà deux électrons, alors que la couche inférieure n'est pas encore complète. C'est à de tels éléments qu'on donne le nom d'éléments de transition.
Prenons un exemple : le fer a un cortège de 26 électrons ; nous aurons donc, sur les niveaux $1s$: 2 électrons
$2s$: 2 électrons
$2p$: 6 électrons
$3s$: 2 électrons
$3p$: 6 électrons, soit 18 électrons.

♦ Deux électrons à nombres quantiques identiques sont indiscernables (voir Exclusion de Pauli [Principe d')].

♦ 1 s, 2 s, etc. : notation habituelle en chimie. Par exemple, pour 1 s : 1 désigne le niveau (couche K), s désigne la sous-couche correspondant à $l = 0$.

Le niveau 4*s* se remplit ensuite avec 2 électrons.
Il nous reste 8 électrons qui se placent dans le niveau 3*d*, qui est incomplet, puisqu'il peut contenir 10 électrons. Le fer est donc un élément de transition.
La situation peut être plus compliquée : ainsi, les lanthanides ou terres rares ♦ sont doublement de transition : le remplissage du niveau 6*s* est terminé, alors que non seulement la sous-couche 5*d*, mais encore la sous-couche 4*f* sont incomplètes. Le cérium, par exemple (utilisé dans les pierres à briquet), avec Z = 58, comporte les niveaux 1*s*, 2*s*, 2*p*, 3*s*, 3*p*, 3*d*, 4*s*, 4*p*, 5*s*, 4*d*, 5*p* complets, soit 54 électrons. Après le remplissage du niveau 6*s*, les sous-couches 5*d* avec 1 électron et 4*f* avec 1 électron se trouvent incomplètement remplies.
Les éléments de transition ont des propriétés chimiques assez voisines ; elles sont dues essentiellement à la couche externe, qui est pour tous une couche *s* de 2 électrons.

♦ Les lanthanides sont les éléments qui suivent immédiatement le lanthane dans la classification périodique (ce sont les éléments portant les numéros 58 à 71). Leurs propriétés chimiques sont très voisines (voir le tableau pages 42 et 43).

ENDOÉNERGÉTIQUE ou ENDOTHERMIQUE (Endothermic)

pages 119, 122, 492.

Se dit d'un phénomène qui s'accompagne d'une absorption de chaleur. La décomposition du calcaire en chaux et dioxyde de carbone (gaz carbonique) est une réaction endoénergétique (ou endothermique).

ÉNERGIE (Energy)

pages 23, 36, 39, 53 à 56, 98, 101, 141, 142, 177, 183, 205, 250, 254, 263, 265, 266, 279, 282, 307, 312, 316, 337, 353, 428, 429, 436, 447, 449, 452, 455, 494, 495, 496, 509, 515, 523, 535, 537.

Cette grandeur généralise la notion de travail. « L'énergie est tout ce qui produit ou provient du travail, ou est du travail. »
L'énergie pourra se présenter sous différentes formes :

L'énergie mécanique, c'est-à-dire le travail lui-même.
Si ce travail peut être produit, sans l'être effectivement, on parlera d'énergie potentielle ; le ressort d'un jouet mécanique, le poids d'une horloge remontée ont de l'énergie potentielle.
Si le corps considéré est en mouvement, il a une énergie cinétique ♦ proportionnelle, pour un corps en translation, à sa masse et au carré de sa vitesse :

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2.$$

♦ Cinétique : du grec *Kinêmatikos*, signifiant mouvement.

L'énergie thermique (ou calorifique). Les échanges entre énergie thermique et mécanique ont été étudiés par Joule et Carnot et font l'objet de la thermodynamique.

L'énergie électrique, *l'énergie rayonnante* (énergie solaire), *l'énergie chimique* sont bien connues. Toutes ces énergies peuvent être théoriquement transformées en travail (moteurs, piles, etc.). On peut en dire autant de *l'énergie nucléaire*.
D'une façon générale, toutes ces formes d'énergie sont équivalentes. C'est ce qu'exprime le premier principe de la thermodynamique, qui est un principe de conservation. L'apparition, dans un système isolé, d'une quantité d'énergie sous une forme donnée entraîne la disparition de la même quantité, au total, sous les autres formes.
On doit à Einstein d'avoir montré que la masse elle-même était une forme d'énergie, qu'on doit inclure dans le bilan énergétique des transformations que subit un système.

L'énergie se mesure en unités de travail, donc en joules (J), dans le système international. Pour l'énergie thermique on utilise encore la calorie. 1 calorie vaut 4,18 joules.

ÉNERGIE NUCLÉAIRE (ou atomique) (Nuclear energy)

pages 269, 275, 314, 359.

On désigne ainsi l'énergie apparaissant sous diverses formes (émission de radiations, production de chaleur, énergie cinétique des particules émises, etc.), lors d'une réaction nucléaire. Elle trouve son origine dans l'énergie de liaison ♦ des différentes particules d'un noyau. Lors de la fission d'un noyau lourd (nombre de masse [A] élevé) ou la fusion de noyaux légers (A faible), la masse des produits formés est inférieure à celle des noyaux primitifs. C'est cette différence de masse ♦ qui produit l'énergie observée.

♦ Voir l'article : l'Atome, pages 53 à 55.

♦ Voir l'article : l'Atome, pages 52 et 53.

ÉNERGIE RÉTICULAIRE (Reticular energy)

En cristallographie, on appelle énergie réticulaire l'énergie nécessaire à la mise en place, dans le réseau cristallin, des différents ions, atomes ou molécules qui le constituent. Sa connaissance permet d'avoir une idée de la stabilité de l'édifice formé.

ENTROPIE ♦ (Entropy) pages 83, 123, 136, 265, 493, 515.

♦ Se reporter à Fonctions d'état.

Ce qu'exprime l'entropie, c'est l'état d'ordre d'un système, et l'augmentation d'entropie correspond au passage d'un état ordonné à un autre moins ordonné (la fusion, par exemple).

Cette notion a été rendue nécessaire pour interpréter l'irréversibilité de certaines transformations : le choc d'un marteau sur de la glace fait fondre une partie de celle-ci, mais la congélation de la glace ne peut faire remonter le marteau.

L'entropie est constante pour une transformation réversible, elle augmente lors d'une transformation irréversible. Il en résulte que l'entropie d'un système isolé ne peut que rester constante ou augmenter au cours de ses transformations.

On a fait intervenir l'entropie dans le domaine de l'information. Szilard ♦ a montré qu'une source fournissant une information voit son entropie augmenter et que le système recevant cette information perd de l'entropie.

♦ Léo Szilard, physicien américain d'origine hongroise (mort en 1964).

ÈQUILIBRE (Equilibrium) pages 37, 118, 120, 124, 125, 189, 237 à 238, 250, 264, 309, 324, 448, 479, 493, 508, 514, 517, 531, 532.

On dit qu'un système est en équilibre lorsque aucune des grandeurs physiques le caractérisant ne subit de variations dans le temps.

Équilibres stable, instable et métastable

Un équilibre est stable lorsque le système tend à revenir spontanément à son état d'équilibre si on l'en écarte légèrement : un pendule écarté de sa position d'équilibre (fil vertical) tend à reprendre celle-ci.

Si on écarte un peu le système de ses conditions d'équilibre, il peut arriver qu'il n'y revienne pas. L'équilibre était instable, et le système évolue vers des conditions d'équilibre stable.

Il peut arriver qu'on trouve toutes les apparences d'un équilibre stable : mélange hydrogène-oxygène, par exemple. Or une étincelle provoque une explosion et une transformation du mélange en eau : on dira que l'équilibre était métastable.

Équilibres physique et chimique

Il est classique de distinguer entre ces deux formes d'équilibre.
L'équilibre de l'eau liquide avec la glace est un équilibre physique. Il ne met pas en cause la nature chimique de l'eau.
L'équilibre, à température élevée, entre la vapeur d'eau et ses constituants, hydrogène et oxygène, est un équilibre chimique, puisque l'évolution du système entraînerait des transformations chimiques (décomposition ou formation d'eau). En fait, la distinction est souvent difficile, et l'on parle d'équilibres physico-chimiques.

Lois des équilibres ♦

♦ Se reporter à l'article : la Chimie, pages 117 à 119.

Il est assez remarquable que tous les équilibres obéissent à des lois de modération : la modification d'un facteur d'équilibre entraîne une transformation tendant à modérer la variation de ce facteur.
— *Loi de Van't Hoff :* une augmentation de température déplace l'équilibre par une réaction absorbant de la chaleur, donc tendant à limiter l'élévation de température.
La décomposition de l'eau en oxygène et hydrogène, nécessitant un apport de chaleur, est d'autant plus importante que la température est plus élevée.
— *Loi de Le Châtelier* : une compression favorise l'évolution du système dans le sens qui limite cette compression, donc dans le sens d'une diminution de volume : l'équilibre eau-hydrogène-oxygène est déplacé dans le sens de la formation d'eau par une compression, car cette réaction se fait avec diminution de volume.
— *Loi de Guldberg et Waage :* si l'on augmente la concentration d'un des constituants du système, l'équilibre est modifié dans le sens qui produit la disparition de ce constituant. Si l'on ajoute de la vapeur d'eau au système déjà envisagé, le système évoluera vers un nouvel équilibre par la réaction de décomposition de l'eau.
L'étude thermodynamique des équilibres, qui — remarquons-le — sont des équilibres statistiques, c'est-à-dire à notre échelle et non à celle des particules, est un des domaines où se rencontrent la physique et la chimie. Dans ce cas, c'est la chimie qui a bénéficié largement de l'apport de la physique, par les travaux de Nernst ♦ s'ajoutant à ceux des savants déjà cités.

♦ Walter Nernst (1864-1941) : physicien allemand, dont les travaux ont surtout porté sur la thermodynamique et ses applications à la chimie. Il a établi en particulier la théorie thermodynamique des piles. Prix Nobel en 1920.

ÉQUILIBRE RADIOACTIF ♦ (Radioactive equilibrium)

Lorsqu'un élément se désintègre par radioactivité, il donne naissance à un autre élément qui peut être radioactif, lui aussi et ainsi de suite. On obtient un mélange dont chacun des constituants a sa propre durée de vie. Il s'établit un équilibre entre les différents constituants, caractérisé par le fait que le nombre des noyaux reste constant pour chaque élément, car il s'en désintègre à chaque instant autant qu'il s'en forme ♦. C'est ce qui explique qu'à l'uranium naturel soient associés le radium et ses produits de désintégration, en proportion constante.

♦ Se reporter à l'article : l'Atome, pages 57 à 64, et à Séries radioactives.

♦ Voir l'article : l'Atome, pages 47 et 48.

ÉQUIVALENCE (Principe d') (Equivalence principle)

pages 182, 183, 191, 252, 316, 484, 494, 515.

Le principe d'équivalence, ou premier principe de la thermodynamique, énoncé par Joule en 1842, exprimait que « chaleur et énergie mécanique » étaient interchangeables. Ce principe d'équivalence s'est progressivement étendu à toutes les formes d'énergie, y compris la masse, par la relation d'Einstein ♦.

♦ Voir Énergie.

Ce principe n'établit pas de hiérarchie entre les différentes formes d'énergie et ne rend pas compte de la possibilité ou de l'impossibilité des transformations envisagées. Il exprime la conservation de l'énergie ou, si l'on veut, l'impossibilité de créer de l'énergie sans contrepartie, c'est-à-dire « gratuitement ».

ESPACE (Space) : voir Dimension et les pages 103, 148, 256, 280, 330, 495.

ESTER (Ester) pages 23, 123, 131.

Molécule organique résultant de l'action d'un acide sur un alcool avec élimination d'eau, au cours d'une réaction lente et limitée par la réaction inverse qui se produit simultanément, et qu'on peut schématiser par :

$$R-C\begin{matrix}\diagup O \\ \diagdown OH\end{matrix} + R'OH \rightleftharpoons R-C\begin{matrix}\diagup O \\ \diagdown O\end{matrix}-R' + H_2O$$

acide organique alcool ester eau

Les esters sont en général des produits odorants, qu'on trouve dans beaucoup de substances naturelles : ils donnent le bouquet aux vins, par exemple.

ÉTAT (State) pages 202, 264, 265, 269, 321, 329, 330, 337, 348, 445, 448, 449, 478, 481, 501, 509, 514, 515, 530, 532.

États de la matière

Il est classique de dire que, suivant sa température, un corps peut se présenter sous trois états physiques : solide, liquide ou gazeux.

Il serait plus correct de parler d'état cristallin plutôt que d'état solide. Le propre de l'état cristallin est d'être ordonné ♦.

♦ Voir l'article : le Cristal.

Les états liquide et gazeux sont des états fluides, ce qui implique que les molécules ou ions constituant la matière sont suffisamment libérés par l'agitation thermique des forces d'attraction mutuelle pour que le corps n'ait plus de forme propre. Cette libération est à peu près totale dans le cas d'un gaz, où les molécules sont sensiblement indépendantes les unes des autres.

On tend à considérer aujourd'hui le plasma comme un quatrième état. Il s'agit, en quelque sorte, d'un gaz d'ions, ce qui implique une température élevée.

Changements d'état

Tout corps pur est caractérisé par les températures auxquelles, sous une pression déterminée, il passe d'un état à un autre. Chacun connaît la température de fusion de l'eau, sous la pression atmosphérique normale, qui fixe le zéro des thermomètres (0° C) et la température d'ébullition de l'eau, qui fixe le point 100° C.

Le changement d'état d'un corps nécessite des échanges de chaleur ; chaque corps pur est caractérisé par la chaleur latente de changement d'état, quantité de chaleur à fournir (ou enlever) à l'unité de masse d'un corps pour le faire changer d'état sans variation de température. Par exemple, la chaleur de fusion de l'eau est 80 calories par gramme, ce qui signifie qu'il faut apporter 80 calories à 1 g de glace à 0° C pour en faire 1 g d'eau à 0° C.

ÉTHER (Ether) pages 198, 268, 279, 330, 340, 352.

Toutes les ondes connues (mécaniques, sonores) se propageant dans un milieu matériel, la théorie ondulatoire de la lumière supposait également un support matériel pour l'onde lumineuse ou, plus généralement, électromagnétique. Pourtant, celle-ci se propage dans le vide, d'où l'hypothèse de l'éther, milieu baignant

et imprégnant tous les corps transparents et emplissant le vide, impalpable et pourtant élastique comme le meilleur acier. Pour expliquer qu'il ne transmet que des ondes transversales, il faut lui attribuer les propriétés d'un solide incompressible (les ondes longitudinales sont des ondes de compression ♦). L'expérience de Michelson et Morley devait montrer l'existence de l'éther. Son résultat négatif a conduit à la relativité et à la mécanique ondulatoire, qui rendent inutile l'intervention de l'éther.

♦ Vibrations transversales et longitudinales : voir Vibratoire (phénomène).

ÉTRANGETÉ (Strangeness) pages 29, 142, 272, 306, 317, 435.

Nombre quantique introduit par Murray Gell-Mann pour expliquer le comportement de certaines particules, produites dans les grands accélérateurs. On affecte une étrangeté nulle (S = 0) aux particules « ordinaires » : proton, neutron, mésons π^-, π^+, π^o. D'autres particules ont une étrangeté non nulle :

hypérons	lambda	Λ^o	pour lequel $S = -1$
	sigma	$\Sigma^o\ \Sigma^-\ \Sigma^+$	pour lesquels $S = -1$
	ksi	$\Xi^-\ \Xi^+$	pour lesquels $S = -2$
mésons	$K^+\ K^o$		pour lesquels $S = +1$
	$K^-\ \overline{K^o}$ (anti-K^o)		pour lesquels $S = -1$.

Cette notion permet de classer les désintégrations en deux groupes : celui dans lequel l'étrangeté se conserve : la somme des étrangetés des particules avant et après désintégration reste constante (interactions fortes) et celui dans lequel la règle précédente se trouve violée (interactions faibles). On a pu ainsi prévoir certaines réactions vérifiées expérimentalement par la suite.

ÉVAPORATION (Evaporation) page 108.

Cas particulier de la vaporisation d'un liquide, dans lequel le phénomène se produit à la surface du liquide, dans une atmosphère illimitée ou de volume très grand. L'évaporation est d'autant plus active que l'atmosphère est moins chargée de vapeur (ou plus loin de la saturation) et, naturellement, que la surface de contact entre le liquide et l'atmosphère est grande.

EXCLUSION DE PAULI (Principe d') (Pauli exclusion principe) pages 40, 50, 256, 292, 409, 444.

Principe exprimant que deux électrons distincts doivent différer par au moins un de leurs quatre nombres quantiques. Au contraire, deux électrons d'un atome, définis par les mêmes nombres quantiques, sont indiscernables. Ce principe entraîne l'existence de « cases quantiques » contenant deux électrons de même énergie, mais de spin opposé ♦.

♦ Voir Nombre quantique.

EXOÉNERGÉTIQUE ou EXOTHERMIQUE (Exothermic) pages 48, 118, 120, 122, 492.

Phénomène s'accompagnant d'un dégagement de chaleur : la combustion du carbone est un phénomène exoénergétique.

FG

FAMILLES RADIOACTIVES (ou Séries radioactives) page 501.

Ce sont les séries constituées par un élément radioactif de longue période et les produits des désintégrations successives, conduisant finalement à un élément stable ♦.

♦ Voir l'article : l'Atome, page 61.

Trois familles existent dans la nature :
— celle de l'uranium, comprenant le radium et aboutissant au plomb 206 ;
— celle du thorium, aboutissant au plomb 208 ;
— celle de l'actinium, aboutissant au plomb 207.
Il faut y ajouter une quatrième famille, n'existant pas dans la nature, car elle ne comprend que des éléments de courte période, donc ayant disparu depuis longtemps : celle du neptunium, dont l'élément ultime est le bismuth 209.

FARAD : voir Unité et les pages 13, 139.

FARADAY (Michael) pages 33, 102, 186, 187, 189, 191, 193, 196, 200, 258, 277, 325, 338, 489.

Physicien et chimiste anglais, né à Newington (Surrey) en 1791, mort à Hampton Court (près de Londres) en 1867.

(Viollet)
Michael Faraday

Fils d'un forgeron, cet extraordinaire autodidacte a consacré toute sa vie à l'étude de l'électricité et du magnétisme. Successivement apprenti chez un relieur, assistant d'un chimiste en renom, directeur du laboratoire de ce dernier, Faraday couronne sa brillante ascension comme professeur de chimie.
Les découvertes de Faraday en électricité sont aussi importantes que nombreuses. En 1821, il découvre que les aimants exercent une action mécanique sur les conducteurs parcourus par un courant. Cherchant ensuite à produire un courant électrique à partir de l'attraction magnétique, il invente, en 1831, le premier transformateur et met en évidence l'induction électromagnétique par une série d'expériences célèbres, dont l'anneau d'induction et le disque de cuivre qui est la première dynamo. Par ailleurs, il démontre l'effet inducteur d'un circuit électrique sur un autre, malgré l'absence d'un aimant.
Se consacrant alors à l'électrostatique, il vérifie le principe de conservation de l'électricité, énonce la théorie de l'électrisation par influence, montre qu'un conducteur creux forme écran pour les actions électriques (la célèbre cage de Faraday) et découvre que l'énergie électrostatique est localisée dans les diélectriques, ce qui lui permet de définir le pouvoir inducteur spécifique ou permittivité des isolants.
Pour expliciter ces expériences, Faraday emploie le vocable « lignes de force »,

notion fondamentale qui préfigure l'image d'un univers fait de champs de divers types. C'est à partir de ces conceptions que Maxwell développera les bases des théories modernes sur les phénomènes électromagnétiques. Faraday, toujours à la recherche de l'unité, a enfin montré que « l'électricité, quelle qu'en soit sa source, est de nature identique ».

En dehors de ses apports en électricité, Faraday contribue à l'avancement de la science par de multiples découvertes. En chimie, il expose des méthodes de liquéfaction des gaz et découvre le benzène. Le premier à produire des températures inférieures à 0° Farenheit en laboratoire, il peut être considéré comme un des pionniers de la cryogénie. En électrochimie, il énonce les lois fondamentales de l'électrolyse, qui portent son nom, et introduit les mots « anode », « cathode », « anion », « cation » et « électrode ». En optique, il se penche longuement sur le verre optique et énonce le principe de rotation du plan de polarisation ♦ de la lumière dans un champ magnétique.

♦ Voir l'article : l'Optique, pages 395 à 398.

Conférencier célèbre, membre de la Royal Society, ce génial savant et expérimentateur a toujours eu le don de « sentir la vérité » et le courage de la chercher jusqu'au bout.

Ouvrages essentiels :
Manipulations chimiques (Sautelet, Paris, 1827) ;
Histoire d'une chandelle (Hetzel, Paris, 1865) ;
On the various forces of nature and their relations to each other (Londres, Chatto and Winders, 1894) ;
Scientific papers (Collier & Son, New York, 1910) ;
Recherches expérimentales en électricité (Gauthier-Villars, Paris, 1968).

FARADAY (Faraday)

Le faraday est la charge portée par une mole (molécule-gramme) d'électrons. Elle vaut sensiblement 96 490 coulombs ♦.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13

FARADAY (cage de) (Faraday cage) pages 189, 257.

Les propriétés des conducteurs creux montrent que, quels que soient les champs électriques extérieurs, ils sont sans action sur les corps placés dans la cavité du conducteur. D'où les divers dispositifs de protection connus sous le nom de cage de Faraday. Par exemple, une voiture métallique est une protection contre la foudre. De même, une cage de grillage relativement peu serré est un écran protégeant un appareil contre les champs extérieurs ou, au contraire, protégeant les autres appareils d'un laboratoire contre le champ créé par l'appareil placé dans la cage.

FARADAY (loi de) (Faraday's law of electrolysis) pages 186, 195, 204.

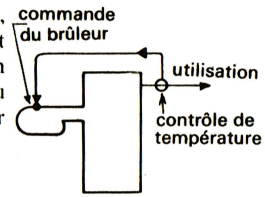
Loi quantitative de l'électrolyse : le passage dans un électrolyte d'une quantité d'électricité égale à 96 500 coulombs provoque, à la cathode, le dépôt d'une valence-gramme de métal ou le dégagement de 1 g d'hydrogène. On appelle valence-gramme la masse, mesurée en grammes, par un nombre égal au quotient $\frac{A}{n}$ de la masse atomique A par la valence n du métal.

Par exemple : argent : $A = 108, \quad n = 1, \quad \frac{A}{n} = 108$ g

cuivre : $A = 63{,}6, \quad n = 2, \quad \frac{A}{n} = \frac{63{,}6}{2}$ g

FEED-BACK (ou rétroaction) pages 169, 223.

Opération fondamentale de toute régulation ou automation : une information, recueillie en aval d'un appareil, agit sur un dispositif qui modifie le fonctionnement de l'appareil d'après l'information reçue ♦. Le thermorégulateur d'une installation de chauffage est un exemple simple : la baisse de température du circuit d'eau chaude, en aval de la chaudière, commande la mise en marche du brûleur par feed-back.



FERMI (Enrico) pages 85, 176, 275, 306, 353, 413. 422, 442, 445, 508, 509, 515.

♦ Voir l'article : l'Électronique, page 223.

Physicien italien, naturalisé américain, né à Rome en 1901, mort à Chicago en 1954.

Docteur de l'université de Pise, professeur de physique théorique à Rome, Fermi reçoit le prix Nobel de physique en 1938. Émigrant l'année suivante aux États-Unis, il est nommé professeur à l'université de Columbia, puis il se consacre à des recherches en physique nucléaire à Chicago et à Los Alamos.

La première grande contribution de Fermi à la physique théorique est son explication mathématique du mouvement des molécules de gaz à basse température (statistique Fermi-Dirac).

Le savant italien se tourne alors vers la physique nucléaire et émet l'hypothèse du neutrino. Poursuivant ses recherches sur les substances radioactives artificielles, il perfectionne la théorie de l'émission des rayons bêta. A partir de la fission de l'uranium, il démontre que la transmutation nucléaire se produit dans presque tous les éléments soumis au bombardement des neutrons lents. C'est ce qui lui vaut le prix Nobel.

Contribuant à éveiller l'intérêt du gouvernement américain pour le projet de la bombe atomique, il fait des recherches sur la réaction nucléaire en chaîne et collabore à la construction de la première pile atomique à uranium et graphite. Enfin, il effectue des recherches théoriques et expérimentales sur les interactions entre particules élémentaires puis sur les propriétés de diffusion des mésons par l'action des protons.

(Viollet)

Enrico Fermi

Ouvrages essentiels :

Sui momenti dei nuclei atomici (Bardi, Rome, 1930) ;
Sul calculo degli spettri ioni (Bardi, Rome, 1930) ;
L'Effeto Raman nelle molecole e nei cristalli (Reale Accademia d'Italia, Rome, 1932) ;
Le Orbite degli elementi (Reale Accademia d'Italia, Rome, 1934) ;
Nuclear physics (University of Chicago Press, Chicago, 1935) ;
Collected papers (University of Chicago Press, Chicago, 1962) ;
Thermodynamique (Dunod, Paris, 1965).

FERMI (Fermi)

Unité de longueur, qui vaut 10^{-12} mm (un millionième de millionième de millimètre) ou 10^{-5} angström ♦. Cette unité très petite est utilisée en physique nucléaire,

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 14.

car elle est de l'ordre de grandeur des rayons du proton ou du neutron (le rayon du proton est environ 1,2 fermi).

FERMI-DIRAC (Statistique) (Fermi-Dirac Statistics)

Étude statistique des distributions ♦ possibles de certaines particules, compte tenu de la quantification de l'énergie de celles-ci. Ces particules sont celles dont le spin est demi-entier (l'électron en fait partie). Dans la statistique de Fermi-Dirac, deux particules ne peuvent pas être dans le même état quantique ♦ : c'est l'origine des couches électroniques de l'atome.

♦ Distribution ou répartition des particules suivant leur énergie.

♦ Ce qui conduit au principe d'exclusion de Pauli.

FERMIONS (Fermions) pages 85, 306, 413, 484, 508.

Particules obéissant à la statistique de Fermi-Dirac. Ce sont, outre l'électron : le proton et le neutron, ainsi que le muon (ou lepton mu).

FERRIMAGNÉTISME ♦ (Ferrimagnetism) pages 203, 260, 333, 350.

♦ Se reporter à l'article : Électricité et magnétisme, page 203.

Le ferrimagnétisme est assez analogue à l'antiferromagnétisme. Dans ce dernier, les spins des électrons produisent un moment magnétique, et les physiciens Louis Néel et Lev D. Landau avaient reconnu dès 1932, par des études théoriques, la possibilité que, dans un « domaine ♦ élémentaire », les spins, donc les moments magnétiques, sont orientés moitié dans un sens, moitié dans l'autre, donnant un magnétisme global nul.

Le ferrimagnétisme est analogue, mais les spins orientés dans un sens ne compensent que partiellement ceux qui sont orientés dans l'autre. Il existe donc un magnétisme non nul, et la substance sera sensible aux champs extérieurs. Les substances ferrimagnétiques peuvent donc s'aimanter comme les ferromagnétiques (fer, nickel, cobalt). Elles tirent leur nom des ferrites (oxydes complexes de fer et de métaux bivalents divers) et sont susceptibles de nombreuses applications : mémoire de calculateurs ou antenne de radio portative et... fermetures de placards.

La connaissance du ferrimagnétisme a beaucoup progressé grâce à Louis Néel, qui a reçu pour sa contribution à cette étude le prix Nobel en 1970.

♦ Pour rendre compte de l'absence d'aimantation spontanée, P. Weiss a émis l'hypothèse de petits éléments de volume ou domaines, doués chacun d'une aimantation indépendante des domaines voisins. Statistiquement, toutes les directions d'aimantation pour un domaine sont également probables ; il en résulte que l'aimantation moyenne est nulle. Lorsqu'on soumet la substance à un champ magnétique extérieur, ces domaines s'orientent à la manière d'un aimant, donnant à l'ensemble une aimantation perceptible. Ces domaines ont été mis en évidence par Barkhausen (1919) qui, grâce à un microphone, put faire entendre un crépitement dû à l'orientation des domaines d'un barreau de nickel soumis à un champ magnétique variable.

FERROMAGNÉTISME ♦ (Ferromagnetism) pages 28, 168, 200, 202, 260, 308, 319, 333, 334, 350, 412, 536

C'est le magnétisme du fer et de l'acier, ainsi que du cobalt et du nickel. Il consiste dans l'orientation progressive, sous l'action d'un champ magnétique extérieur, des moments magnétiques (donc de l'aimantation) des différents domaines, dans la direction et le sens du champ extérieur. Suivant la nature du corps, cette aimantation subsiste (aimants permanents) ou non (aimants temporaires) postérieurement à la cessation du champ magnétisant.

Pierre Curie a étudié le ferromagnétisme et montré qu'il cessait à une température caractéristique de la substance (température de Curie), qui devient paramagnétique.

Les moments magnétiques des domaines ♦ élémentaires sont dus au spin des électrons.

Chaque atome a un moment magnétique qui s'oriente parallèlement à celui des atomes voisins et tous dans le même sens.

L'application des théories quantiques au ferromagnétisme a permis non seulement de l'interpréter, mais de prévoir d'autres cas, qui sont l'antiferromagnétisme et le ferrimagnétisme.

♦ Se reporter à l'article : Électricité et magnétisme, page 202.

♦ Voir note ci-dessus.

L'intensité de l'aimantation d'une substance ferromagnétique dépend du champ magnétique extérieur, mais ne croît pas indéfiniment avec celui-ci. Il y a saturation à partir d'une certaine valeur du champ. A ce moment, les domaines élémentaires ont tous acquis la même direction d'aimantation.

FEYNMAN ♦ (Richard)

♦ Voir Diagramme de Feynman.

Physicien américain, né à New York en 1918.
Diplômé du Massachusetts Institute of Technology et de l'université de Princeton, actuellement professeur de physique théorique au California Institute of Technology et membre de nombreuses sociétés scientifiques, Feynman reçoit le prix Nobel de physique en 1965.
Travaillant au projet de la bombe atomique, Feynman s'est distingué par ses recherches sur l'électrodynamique quantique et par sa découverte du principe de la moindre action dans la mécanique quantique.
Par ailleurs, il a effectué un certain nombre de travaux importants sur l'hélium liquide ♦, sur les interactions faibles et sur le rayonnement bêta mou (c'est-à-dire de faible énergie).

♦ On obtient de l'hélium liquide à une température de l'ordre de 4°K, soit — 269°C (voir le tableau des symboles et unités, page 14).

Ouvrage essentiel :
The Feynman lectures on physics (Addison-Wesley, Readings [Mass.], 1963).

FIBRES OPTIQUES (Optic Fibres) pages 369, 410.

Une application récente du phénomène de réflexion totale consiste à conduire la lumière et l'image d'un point à un autre, par n'importe quel trajet, à l'aide d'un faisceau de fibres optiques.

Onde dans une fibre

Une fibre est un cylindre de verre ou de plastique de très petit diamètre (50 microns ♦) qui peut atteindre plusieurs mètres de longueur. Envoyons dans une telle fibre un rayon lumineux faisant un angle α avec la face d'entrée. Le rayon se réfracte, pénètre dans le verre, puis va se réfléchir totalement sur la paroi de la fibre sous un angle β, à condition que β soit supérieur à l'angle de réfraction limite ♦. Cette condition impose que l'angle α soit inférieur à un angle donné de l'ordre de 33°, pour les fibres usuelles. Le rayon va se réfléchir un grand nombre de fois sur les parois de la fibre, suivant le même angle β, pour ressortir à l'extrémité en faisant l'angle α avec la face de sortie. Aucune de ces propriétés n'est modifiée si l'on courbe la fibre. Celle-ci se comporte comme un conducteur de lumière, souple.

♦ 1 micron = 1 μ = 10^{-3} mm.

♦ Voir Réfraction.

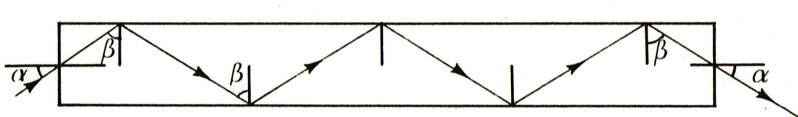
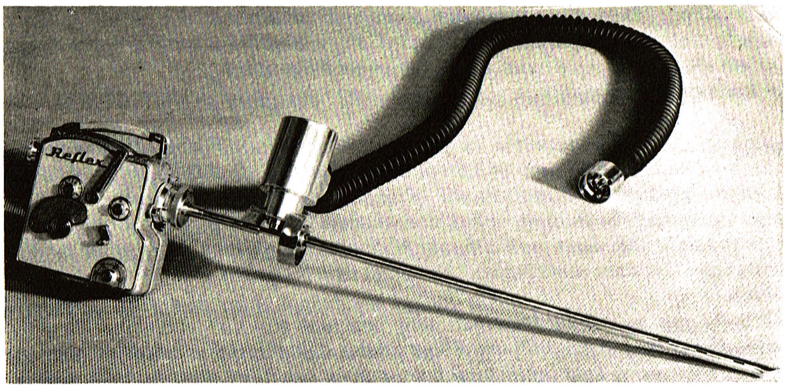


Image dans un faisceau de fibres

Groupons les fibres de façon à former un faisceau d'environ 1 cm² de section (ce qui représente quelques dizaines de milliers de fibres).
Plaquons sur la section droite ♦ du faisceau une diapositive et éclairons par transparence. Chaque fibre va transporter une partie de l'information contenue sur la diapositive. On réalise ainsi une analyse point par point de l'objet. A

♦ Section terminale perpendiculaire au faisceau.



Endoscope universel, mis au point au laboratoire de métrologie optique de l'Institut optique (C.N.R.S.). Le conducteur d'image est, ici, un barreau rigide de verre et non un faisceau de fibres souples.

Calculs vésicaux photographiés à l'aide de l'endoscope décrit ci-dessus (cliché Dr Chaupitre).

l'extrémité du faisceau, on obtiendra, sur un écran, la reconstrution exacte de la diapositive, à condition que les fibres aient été correctement ordonnées. Si, sur le trajet, les fibres ont été mélangées, l'image, à l'extrémité, sera totalement incohérente.

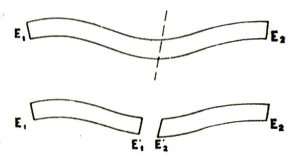
Mais un tel procédé est limité : on ne pourra pas distinguer des détails de dimension inférieure au diamètre de la fibre, puisque chaque fibre ne transmet que le flux lumineux qu'elle a reçu à l'entrée et non pas une image.

Endoscopie médicale

En chirurgie, les fibres sont très utilisées pour explorer les cavités du corps humain. On utilise, pour cela, deux faisceaux de fibres: l'un sert à l'éclairage, l'autre à l'observation. Chaque fibre est munie à ses extrémités d'un oculaire et d'un objectif, de façon à élargir le champ d'observation.

Codage

Considérons un faisceau de fibres totalement mélangées, mais dont les deux extrémités E_1 et E_2 présentent le même ordre. L'image obtenue a l'extrémité E_2 sera semblable à l'objet placé en E_1. Si l'on coupe le faisceau de fibres en son milieu, on obtient deux faisceaux E_1 E'_1 et E_2 E'_2. L'image obtenue en E'_1 sera incohérente ; par contre, en replaçant le morceau E_2 E'_2 avec une orientation correcte, on peut reconstituer l'image. On voit l'utilisation que l'on peut faire de ce procédé pour



le codage d'un message : le message en clair est placé en E_1. On photographie l'image incohérente fournie en E'_1. La diapositive obtenue est envoyée à une personne qui possède le faisceau E_2 E'_2. En plaçant la diapositive en E'_2 dans l'orientation correcte, elle reconstitue le message en clair en E_2.

FILIÈRE ♦ (Stock) page 492.

♦ Se reporter à l'article : l'Atome, pages 62 à 64, et à Réacteur nucléaire.

En langage de technologie nucléaire, la filière est la technique qui permet de produire de l'énergie électrique à partir d'une réaction nucléaire. Elle conditionne donc le type de réacteur utilisé.
La filière française utilise l'uranium naturel comme combustible, dans un réacteur modéré au graphite, la chaleur produite étant évacuée par une circulation de gaz carbonique sous pression. C'est ainsi que fonctionnent les centrales de Chinon et de Saint-Laurent-des-Eaux. Sa concurrente américaine part d'uranium enrichi et utilise comme fluide thermique l'eau soit sous pression, soit bouillante.
Techniquement, les deux grandes filières se valent.

FISSION ♦ (Fission) pages 53, 67 à 71, 84, 138, 142, 166, 172, 253, 259, 269, 270, 275, 351, 352, 386, 491, 498, 519, 529.

♦ Se reporter à l'article : l'Atome, pages 66 à 71.

Rupture, sous l'action d'un neutron incident, d'un noyau lourd en deux (ou plus rarement trois) noyaux légers (découverte de Hahn et Strassman, 1931).
L'arrivée d'un neutron à une vitesse modérée (énergie cinétique de l'ordre de 1 *e*V ♦) sur un noyau peut rompre l'équilibre des forces nucléaires et provoquer, de ce fait, la formation d'un nouveau système comportant des noyaux plus légers

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 14.

Par exemple, un des modes possibles de fission de l'uranium 235 est le suivant :

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{94}_{38}Sr + ^{140}_{54}Xe + ^{1}_{0}n + ^{1}_{0}n + \gamma$$

uranium 235	neutron	strontium 94	xénon 140	2 neutrons	rayonnement gamma

Ce n'est pas le seul, mais en général les fragments sont différents.
On remarque également l'émission de neutrons, ce qui est normal car le rapport du nombre de neutrons au nombre de protons augmente lorsque la masse du noyau croît. Lors de la fission, il sera donc nécessaire que les noyaux produits expulsent leurs neutrons excédentaires. Le rayonnement gamma est une des manifestations de l'énergie libérée lors de la fission, l'autre étant l'énergie cinétique des neutrons et noyaux produits. C'est cette énergie, transformée partiellement en chaleur, qui est utilisée dans les réacteurs nucléaires. Elle est très importante, car la fission se fait avec un défaut de masse ♦ sensible (environ 1/1000). L'émission de neutrons rend possible des processus en chaîne : un des neutrons produits provoque la fission d'un autre noyau, qui émet des neutrons, et ainsi de suite. Suivant la façon dont est contrôlée la réaction, on aura une source d'énergie (réacteur) ou une bombe atomique !

♦ Voir l'article : l'Atome, pages 52 et 53.

Outre l'uranium 235, d'autres noyaux sont susceptibles de subir la fission. Citons l'uranium 233 et le plutonium 239.

FIZEAU (Hippolyte Armand) pages 178, 266.

Physicien français, né à Paris en 1819, mort à Venteuil (Seine-et-Marne) en 1896. Fortuné, Fizeau peut s'adonner entièrement à sa passion pour les sciences et, en particulier, pour la recherche expérimentale en physique. Membre de l'Académie des sciences, il en devient président en 1878.

Les travaux de Fizeau sont particulièrement remarquables en optique. En 1849, il est le premier à mesurer la vitesse de la lumière par une méthode terrestre : la roue dentée. L'année suivante, il détermine la vitesse de propagation du courant électrique. Travaillant en collaboration étroite avec Léon Foucault, il fait diverses observations sur la chaleur et sur la lumière et étudie la portion infrarouge du spectre solaire. Il reprend et met au point le principe de Doppler ♦ sur la lumière en provenance d'une source en mouvement, puis l'applique à des mesures d'astrophysique, dont les vitesses des étoiles. Au cours d'expériences ultérieures, il emploie un condensateur pour augmenter l'efficacité des bobines d'induction, a l'idée d'utiliser les longueurs d'onde lumineuse comme étalons de longueur ♦ et applique des méthodes d'interférence lumineuse pour mesurer la dilatation des cristaux.

♦ Voir ce mot.

♦ Voir Unité.

Ouvrages essentiels

Mémoire sur la dilatation des corps par la chaleur (Gauthier-Villars, Paris, 1866) ;
Notes pratiques sur les opérations de la photographie pendant le prochain passage de Vénus sur le Soleil (Didot, Paris, 1874) ;
Discours (Firmin-Didot, Paris, 1878-1889).

FLUIDE (Fluid)

pages 24, 120, 138, 185, 196, 208, 255, 269, 305, 329, 332, 334, 335, 352, 444, 478, 491, 505, 509, 525.

Étymologiquement, substance qui peut couler. On désignera donc sous le nom de fluides les corps dans un état où ils n'ont pas de forme propre. L'état fluide compte donc les liquides et les gaz. La distinction entre liquide et gaz est moins aisée qu'il ne semblerait au premier abord. Si l'on ne peut confondre le gaz carbonique et le liquide obtenu par compression du gaz à une température relativement basse et si le changement d'état est observable, au contraire, à partir de 31°C on ne peut plus distinguer le liquide du gaz.

On définira ainsi, pour chaque fluide, une « température critique » en dessous de laquelle la distinction entre liquide et gaz a un sens.

L'étude des écoulements fluides constitue l'hydrodynamique et l'aérodynamique, dont on saisit l'importance ; ce sont là des sciences beaucoup plus récentes que l'étude des fluides en équilibre, qu'il faut faire remonter à Archimède...

FLUORESCENCE (Fluorescence)

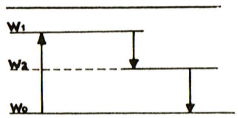
pages 57, 98, 196, 326, 331, 411, 447, 481, 490, 498, 527.

Émission, par certaines substances sous l'action d'un rayonnement visible X, gamma, etc., ou d'un flux de corpuscules (électrons, par exemple), de lumière visible : l'écran d'un téléviseur devient fluorescent sous l'action d'un pinceau d'électrons émis par le canon à électrons.

La « lumière noire » est un effet lumineux produit par la fluorescence de peintures spéciales sous l'action d'une source de rayons ultraviolets auxquels l'œil est insensible.

♦ Voir Couches électroniques et Éléments de transition.

L'interprétation est une conséquence de la structure de l'atome. Dans celui-ci, les électrons sont sur des niveaux d'énergie bien déterminés ♦. Par un apport d'énergie (électron incident ou photon), il se peut qu'un électron subisse une transition le faisant passer de son niveau fondamental à un niveau d'énergie plus élevé. L'atome est alors dans un état excité. Le retour à l'état stable se fera lorsque l'électron reviendra, en un ou plusieurs sauts, à son niveau fondamental, en restituant, sous forme de photons, l'énergie qui lui avait été communiquée. On conçoit que, dans ces conditions, la longueur d'onde des photons émis ne



W_2 : apport d'énergie, retour à l'état stable.
W_0 : niveau fondamental.
W_1 : état excité.

puisse pas être inférieure à celle du photon incident, puisque l'énergie de un photon s'exprime par : $W = \frac{hc}{\lambda}$, où h est la constante de Plank, c la célérité de la lumière et λ la longueur d'onde.

FLUX : voir Électricité et magnétisme, pages 189 à 197, et les pages 308, 338, 351, 358, 419.

FONCTIONS D'ÉTAT ou FONCTIONS THERMODYNAMIQUES (State functions) pages 493, 510.

L'état d'un système physique est caractérisé par les valeurs que prennent un certain nombre de paramètres, ou variables d'état. Ainsi, une masse de gaz est dans un état parfaitement défini par sa température T, son volume v et sa pression p (d'ailleurs liés par une relation, l'équation d'état $f(p, v, T) = 0$).

En thermodynamique, on appelle fonctions d'état des fonctions telles qu'à un état déterminé corresponde une valeur déterminée de la fonction, de sorte que, si le système évolue d'un état A à un état B, la variation que subit la fonction ne dépend que de A et de B, et non du chemin suivi.

Deux fonctions sont fondamentales : l'énergie interne, notée U, et l'entropie, notée S.

L'énergie interne (U)

Elle permet d'énoncer le premier principe de la thermodynamique en exprimant que la variation $\Delta U = U_B - U_A$ ne dépend que des états A et B.

Dans un système qui échange ♦ de la chaleur Q et du travail W avec le milieu extérieur, ΔU est la somme $W + Q$ de la chaleur et du travail échangés : $\Delta U = W + Q$, ou, pour des transformations infiniment petites : $dU = dW + dQ$ ♦.

Plus généralement, la variation d'énergie interne est la somme des énergies (sous toutes les formes) échangées avec l'extérieur.

En fait, seules les variations d'énergie interne sont connues sans ambiguïté. La fonction elle-même n'est connue qu'à une constante près.

♦ On compte positivement les travaux et les quantités de chaleur reçues par le système.

♦ d signifie dérivée (voir Aperçu mathématique, page 16).

L'entropie S

Elle se définit ainsi : si un système reçoit une quantité de chaleur dQ au cours d'une transformation élémentaire, son entropie varie de $dS = \frac{dQ}{T}$ (T étant la température).

Pour une transformation finie amenant le système de l'état A à l'état B, on écrira :

$$\Delta S = S_B - S_A = \int_A^B dS = \int_A^B \frac{dQ}{T} \blacklozenge.$$

♦ Voir Aperçu mathématique, page 17.

La fonction entropie a été introduite par Clausius, qui a énoncé le second principe de la thermodynamique en exprimant précisément que l'entropie est une fonction d'état.

A côté de ces deux fonctions, on utilise :

— *L'enthalpie* $H = U + PV$, où P est la pression et V le volume du système. On démontre que la quantité de chaleur reçue ou cédée lors d'une transformation à pression constante mesure une variation d'enthalpie. Or la plupart des réactions chimiques et des mesures calorimétriques se font à pression constante. On mesure donc souvent des enthalpies.

— *L'énergie libre* $F = U - TS$, dont les variations mesurent, au cours d'une

transformation à volume constant, l'énergie disponible sous une forme autre que la chaleur.
— *L'enthalpie libre* G = H — TS, qui joue le même rôle pour des transformations à pression constante.
Ces deux dernières fonctions sont largement utilisées en thermodynamique chimique, où elles permettent de prévoir les réactions et leurs effets. Elles sont à la base de l'étude thermodynamique des piles électrochimiques.

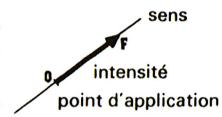
FONCTION CHIMIQUE (Chemical function) page 123.

Ensemble de substances ayant en commun un certain nombre de propriétés chimiques caractéristiques. On parlera ainsi de la fonction acide, de la fonction base, de la fonction alcool, etc.

FONCTION D'ONDE pages 38, 110, 409.

FORCE (Force) pages 92, 95, 101, 113, 180, 184, 185, 187, 192, 193, 205, 208, 257, 266, 268, 270, 274, 276, 305, 309, 316, 325, 338, 345, 352, 386, 421, 422, 425, 426, 445, 446, 448, 478, 482, 483, 489, 492, 518, 526.

On définit classiquement une force comme toute cause capable de produire une déformation (effet statique) ou de créer, modifier ou faire cesser le mouvement d'un corps.



Une force ne peut être définie complètement par son intensité mesurée en newtons ou en kilogrammes-force. Il faut préciser la direction et le sens suivant lesquels elle s'exerce. On reconnaît là une grandeur vectorielle ♦. La représentation d'une force par un vecteur est souvent indispensable.

♦ Voir Aperçu mathématique, page 17.

A l'échelle humaine, il est habituel de distinguer entre forces de contact et forces à distance, ou forces de champ. En fait, ces forces observées peuvent toutes être considérées comme conséquences des interactions de gravitation, électromagnétiques ou nucléaires ; par exemple, le poids d'un corps résulte de l'attraction de la Terre sur ce corps, conséquence de l'interaction de gravitation.
L'unité de force est la force qui communique à une masse de 1 kg une accélération de 1 m/s². C'est le newton (N). On utilise aussi le kilogramme-force, valant 9,81 newtons.

FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE (F.C.É.M.) page 358.

Grandeur caractérisant l'aptitude d'un dispositif, appelé récepteur, à transformer l'énergie électrique en une forme autre que la chaleur : énergie mécanique (moteurs), énergie chimique (cuves à électrolyse, accumulateur en charge, etc.). Elle s'exprime en volts.
La puissance P′ (en watts ♦) recueillie est donnée par la formule : P′ = E′I, où E′ est la f.c.é.m. (en volts) et I l'intensité (en ampères) qui parcourt le récepteur.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

FORCE ÉLECTROMOTRICE (F.É.M.) (Electromotive force) pages 180, 186, 194, 309, 315, 317, 357, 480, 497, 534, 536.

Grandeur caractérisant l'aptitude d'un dispositif (générateur) à produire de l'énergie électrique. Elle s'exprime aussi en volts, et la puissance fournie par un générateur s'exprime par une formule analogue à celle de la force contre-électromotrice : P = EI, où E représente la f. é. m.

Par exemple, la f.é.m. d'une pile Leclanché est 1,5 volt ♦. Celle d'une batterie d'accumulateurs de certaines automobiles est de 12 volts, etc.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

FOUCAULT (Léon)

Physicien français, né à Paris en 1819, mort en 1868.

Sous l'influence de Fizeau, Foucault délaisse ses études de médecine pour se consacrer à la physique expérimentale. Physicien de l'Observatoire, il est également rédacteur de la section scientifique du « Journal des débats ». Parallèlement à Fizeau, Foucault se fait connaître par sa détermination de la vitesse de la lumière dans l'air. Il poursuit ensuite ces expériences dans différents milieux transparents, dont l'eau, et démontre ainsi que la vitesse de la lumière varie selon les milieux, ce qui en confirme sa nature ondulatoire.

Parmi les inventions de Foucault, citons les plus connues : le gyroscope ♦ (1852) ; le prisme à réflexion totale ; la découverte de tourbillons ou « courants de Foucault » provoqués dans un disque en cuivre tournant dans un champ magnétique puissant ; l'interrupteur à mercure, toujours utilisé dans les bobines d'induction.

♦ Voir page 505.

Une expérience spectaculaire le rend, par ailleurs, célèbre à Paris. Il suspend un énorme pendule au sommet de la coupole du Panthéon et démontre ainsi la rotation de la Terre autour de son axe.

Ouvrages essentiels :

Cours de microscopie complémentaire des études médicales (Baillière, Paris, 1844-1845) ;

Sur les vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau (Bachelier, Paris, 1853) ;

Rapport sur le pouvoir éclairant des produits gazeux fournis par la distillation de la tourbe (Wiesener, Paris, 1855) ;

Note explicative sur l'héliostat (Duboscq, Paris, 1863).

FOUCAULT (Courants de) (Foucault currents) pages 264, 445.

Courants produits par induction dans la masse d'un conducteur. Par exemple, la carcasse d'un transformateur soumise à un champ magnétique périodique est parcourue par des courants de Foucault qui provoquent une perte d'énergie, car ils servent uniquement à échauffer les tôles de la carcasse ♦. C'est pourquoi on utilise des tôles vernies empilées, au lieu d'un bloc massif dont la résistance électrique plus faible autoriserait des courants plus intenses.

♦ En effet, la circulation de tout courant et, en particulier, des courants de Foucault produit une dissipation d'énergie sous forme de chaleur. Les tôles du transformateur s'échauffent donc et l'énergie ainsi consommée ne se retrouve pas dans le circuit de sortie.

Les courants de Foucault sont utilisés dans les fours électriques à induction, où ils sont suffisamment intenses pour mettre en fusion une masse métallique. On les met à profit aussi dans certains systèmes de freinage (compteurs d'énergie électrique, certains freins pour véhicules lourds, etc.).

FRANKLIN (Benjamin)

Philosophe, physicien et homme d'État américain, né à Boston en 1706, mort à Philadelphie en 1790.

Jeune apprenti dans une imprimerie, Franklin consacre tous ses loisirs à s'instruire par de nombreuses lectures personnelles. Ses recherches dans le domaine de la science portent surtout sur les phénomènes électriques. Après avoir énoncé le principe de conservation de l'électricité, il découvre, en 1752, la

nature électrique de l'éclair et invente le paratonnerre. Par la suite, il se lance dans la vie politique et y fait une très brillante carrière.

FRÉQUENCE ♦ (Frequency) pages 37, 145, 178, 179, 195, 215, 216, 220, 225, 227, 233, 277, 308, 309, 311, 318, 330, 331, 336, 344, 358, 410, 420, 485, 486, 497, 505, 507, 519, 526, 527.

♦ Se reporter à Vibratoire (phénomène).

Nombre de périodes effectuées par un phénomène périodique pendant l'unité de temps. Si T est la période, la fréquence N est donnée par $N = \frac{1}{T}$. Elle se mesure en hertz ♦ (Hz) ou ses multiples : kilohertz (1 kHz = 1 000 Hz) et mégahertz (1 MHz = 1 000 kHz).

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

Quelques ordres de grandeur :
— fréquence des sons audibles : 16 Hz à 16 000 Hz ;
— fréquence du courant alternatif industriel : 50 Hz ;
— fréquences utilisées en télévision : 200 MHz ;
— fréquence d'une vibration lumineuse jaune : 500 000 MHz.

FRESNEL (Augustin) pages 174, 194, 268, 311, 331, 384, 417.

Physicien français, né à Broglie en Normandie en 1788, mort à Ville-d'Avray en 1827.
Ancien élève de l'École polytechnique et des Ponts et Chaussées, Fresnel travaille longtemps comme ingénieur. Pionnier de la théorie optique, il est membre de l'Académie des sciences et de la Royal Society.
D'importantes recherches sur l'interférence conduisent Fresnel à défendre la théorie ondulatoire de la lumière : sur le plan expérimental avec un dispositif connu sous le nom de «miroirs de Fresnel» et sur le plan théorique en élaborant de sérieuses bases mathématiques. Étudiant les lois de l'interférence des rayons polarisés, il obtient une polarisation circulaire au moyen d'un cristal rhomboédrique ♦ puis en déduit que les vibrations lumineuses sont transversales. Appliquant alors sa découverte aux lentilles qui portent son nom, il révolutionne le mode d'éclairage des phares. Ce principe de polarisation de la lumière aura également une grande répercussion en chimie organique avec les travaux de Pasteur. Par ailleurs, Fresnel émet l'hypothèse de l'éther, propose les intégrales ♦ qui portent son nom, étudie la réfraction dans les cristaux et crée l'optique cristalline.

(Viollet)
Augustin Fresnel

♦ Voir l'article : le Cristal, page 152.

♦ Voir Aperçu mathématique, page 17.

Bibliographie :
De la lumière (A. Colin, Paris, 1914) ;
Œuvres complètes (Imp. impériale, Paris, 1866-1870).

FRESNEL (Miroirs de) (Fresnel lens)

Dispositifs à l'aide desquels Fresnel a réalisé des interférences lumineuses, montrant ainsi la nature vibratoire de la lumière.

FUSÉE (Rocket) page 348.

Dispositif de propulsion dans lequel une masse de gaz, éjectés à grande vitesse, communique à un mobile une impulsion dans le sens contraire à celui des gaz éjectés.
La force propulsive F d'une fusée (ou poussée) est donnée par la formule simple :

$F = \mu v$ où μ représente le débit de gaz (en kg par seconde) et v (en m/s) la vitesse d'éjection de ces gaz par rapport à la fusée. Pour fixer les ordres de grandeur, voici les poussées des trois étages d'une fusée Saturne-V, véhicule des expériences Apollo :

— pour le 1er : elle est de 37.10^6 newtons ;
— pour le 2e : elle est de 49.10^5 newtons ;
— pour le 3e : elle est de 98.10^4 newtons.

La fusée sera peut-être, dans l'avenir, à propulsion ionique ou plasmique ; y seront éjectés soit des ions, soit un plasma, convenablement accélérés et canalisés.

FUSION (Fusion) pages 255, 267, 327, 479, 504.

Changement d'état faisant passer un corps de l'état solide à l'état liquide. Tout corps pur est caractérisé par sa température de fusion ♦ et aussi par sa chaleur de fusion.

♦ La température de fusion dépend de la pression : la glace fond à 0°C sous la pression atmosphérique ; sous une pression supérieure, l'eau reste liquide à cette même température.

FUSION NUCLÉAIRE ♦ (Nuclear fusion) pages 53, 76 à 79, 84, 169, 253, 356.

Réaction nucléaire au cours de laquelle des noyaux légers se combinent pour donner un noyau plus lourd. C'est donc l'opposé de la fission. Les isotopes dans l'hydrogène, deutérium ${}^2_1D$ et tritium ${}^3_1T$, produisent des réactions de fusion.

Par exemple : ${}^2_1D + {}^3_1T \longrightarrow {}^4_2He + {}^1_0n$ ♦

deutérium — tritium — hélium — neutron

Une telle réaction se fait avec un défaut de masse ♦ important (de l'ordre de 1 %) et constitue donc une source d'énergie énorme, mais encore loin d'être utilisée à des applications pratiques. En effet, pour que deux noyaux consentent à la fusion, il faut vaincre la répulsion électrostatique due à leurs protons, donc leur communiquer des vitesses importantes. L'agitation thermique, donnant aux atomes une vitesse croissant avec la température ♦, est le moyen utilisé, mais il faut atteindre des températures de plusieurs millions de degrés. C'est pourquoi la seule application, jusqu'à maintenant, est la bombe H, ou bombe thermonucléaire, où une explosion nucléaire par fission produit l'échauffement nécessaire et sert en somme de détonateur. La réaction citée plus haut nécessite 400 millions de degrés et la fusion ${}^2_1D + {}^2_1D \longrightarrow {}^4_2He$, seulement 45 millions!

La domestication de cette énergie est difficile : il faut, entre autres, maintenir le plasma de deutérium à distance des parois du réacteur par un champ magnétique convenable (« bouteilles magnétiques ») et, surtout, produire sans trop de danger la température d'allumage. Les problèmes posés sont encore loin d'être résolus, malgré les nombreuses recherches effectuées dans ce domaine.

♦ Se reporter à l'article : les Plasmas, pages 473 à 477.

♦ Les chiffres supérieurs indiquent le nombre des particules dans le noyau, les chiffres inférieurs celui des protons.

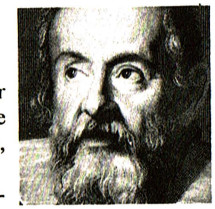
♦ Voir l'article : l'Atome, pages 52 et 53.

♦ Voir Théorie cinétique.

GAINAGE (Casing)

L'uranium utilisé dans les réacteurs nucléaires a des qualités mécaniques médiocres. De plus, il doit être mis à l'abri de la corrosion. C'est pourquoi les barres d'uranium sont enveloppées d'une gaine métallique, en aluminium ou en magnésium, ou encore en zirconium. Ces métaux ont un rôle supplémentaire : ils évitent la contamination du fluide circulant dans le générateur et chargé de l'évacuation de la chaleur produite par des produits radioactifs de la fission.

GALILÉE (Galileo Galilei) pages 198, 338, 363, 494, 511.



(Viollet)

Galilée

Physicien et astronome italien, né à Pise en 1564, mort à Arcetri en 1642.
Génie universellement reconnu, fondateur de la dynamique, Galilée est le premier à énoncer clairement l'idée de force en tant qu'agent mécanique, à percevoir une interaction et une jonction inévitables entre les mathématiques et la physique, et à développer la notion moderne de méthode expérimentale.
Galileo Galilei fait sa première découverte à dix-neuf ans, alors qu'il vient d'abandonner ses études de médecine. Observant une lampe qui se balance sous la voûte de la cathédrale de Pise, il trouve le principe de l'isochronisme ♦ du pendule ; il l'expliquera d'ailleurs plus tard mathématiquement et l'appliquera au calcul du pouls humain et à la construction d'horloges.

♦ Isochronisme : les oscillations successives du pendule ont toutes même durée.

Développant les théories d'Archimède en mécanique, il se lance dans une série d'expériences sur la chute des corps, à l'aide du plan incliné. Après de nombreuses recherches, il découvre la loi du mouvement uniformément varié ♦. D'autre part, se penchant sur l'étude des projectiles, il énonce la loi de leur mouvement et le principe d'inertie. Il met également en évidence les ondes stationnaires, préconise l'emploi du thermomètre à liquides, donne la loi des vases communicants et imagine la balance hydrostatique. En optique, il réalise le premier microscope et la lunette qui porte son nom. Galilée est par ailleurs fort célèbre pour la révolution qu'il provoque en astronomie. Les nombreuses découvertes qu'il fait avec son télescope viennent étayer les doctrines de Copernic. Jugé alors par l'Inquisition puis condamné par l'Église, Galilée est obligé de terminer sa vie en reclus. Il en profite pour se consacrer à la mise au point de ses théories mécaniques, fournissant une explication mathématique du mouvement accéléré et de celui des projectiles.

♦ L'espace parcouru (E) est proportionnel au carré du temps (t) mis pour le parcourir : $E = \frac{1}{2}\gamma t^2$.

Ouvrages essentiels :
Siderius nuncius, le message céleste (Gauthier-Villars, Paris, 1964) ;
Les Mécaniques (P.U.F., Paris, 1966) ;
Dialogues - Lettres choisies (Hermann, Paris, 1966) ;
Opere (œuvres complètes) (Barbera, Florence, 1890-1909).

GAMMA (rayons) ♦ (Gamma rays) pages 98, 114, 263, 264, 312, 318, 347, 351, 433, 434, 449, 482, 487, 491, 495, 504.

♦ Pour plus de précision, lire l'article : l'Atome, page 58.

Rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde, donc très énergétique, émis au cours de certains processus nucléaires, tels que radioactivité α ou β, fission, etc. Ces processus, qui modifient le nombre de particules d'un noyau, donnent dans un premier temps un noyau excité. Le réarrangement des nucléons pour donner un édifice stable se fait avec l'émission d'énergie sous forme d'un photon gamma.
Les propriétés du rayonnement gamma sont celles d'un rayonnement très dur ♦ : un faisceau gamma ne peut être absorbé complètement que par des épaisseurs de plomb de l'ordre de 30 cm. On utilise d'ailleurs de plus en plus des sources gamma dans l'industrie pour radiographier des pièces et en déceler les défauts. Ce sont également les gamma émis par le cobalt 60 (radioactif) qui sont utilisés médicalement dans la bombe au cobalt, qui n'a de bombe que le nom.

♦ Dur ou pénétrant.

GAUSS (Gauss)

Unité : le gauss est une unité d'induction magnétique qui vaut 1/10 000 tesla ♦ (unité du système international).

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

GAUSS (Carl) pages 186, 188, 194, 535.

Mathématicien allemand, né à Brunswick, en 1777, mort à Göttingen en 1855. Enfant prodige en mathématiques, Gauss résout à dix-huit ans un problème qui tenait les géomètres en échec depuis Euclide (la division du cercle en 17 parties égales). Ces brillants débuts ne font que se confirmer. En mathématique, l'œuvre de Gauss est suffisamment importante pour que Laplace dise de lui qu'il est le plus grand mathématicien européen. Professeur de mathématiques et directeur de l'observatoire de Göttingen, Gauss joue également un grand rôle en astronomie (découverte de Cérès, etc.).
Dans le domaine de la physique, il effectue, en collaboration avec Weber, d'importantes recherches en matière de magnétisme terrestre et fonde le premier observatoire destiné exclusivement à ce genre de recherches. En 1832, il propose un système logique d'unités de mesure des phénomènes magnétiques. L'année suivante, il construit un télégraphe électrique. Il fait, par ailleurs, d'importantes contributions en optique (théorie générale des systèmes centrés pour les rayons voisins de l'axe de symétrie du système [c'est ce qu'on appelle, en optique, l'approximation de Gauss]), en cristallographie et en mécanique.
Fondateur des mathématiques modernes, savant de génie, Gauss ne sera reconnu à sa juste valeur qu'au XXe siècle, avec la publication de tous ses ouvrages.

Ouvrages essentiels :
Dioptrische Untersuchungen (Dieterichn, Göttingen, 1816) ;
Atlas des Erdmagnetismus nach den Elementen der Theorie entwoerfen (Weidmann, Leipzig, 1840) ;
Méthodes des moindres carrés (Mallet-Bachelier, Paris, 1855) ;
Théorie du mouvement des corps célestes parcourant des sections coniques autour du Soleil (Bertrand, Paris, 1864) ;
Die Intensität der Erdmagnetischen Kraft auf absolutes Maass zurückgeführt (Engelmann, Leipzig, 1894) ;
Recherches sur la théorie générale des surfaces courbes (Paris, 1949) ;
Recherches arithmétiques (Blanchar, Paris, 1953).

GAY-LUSSAC (Louis-Joseph) page 114.

Né à Saint-Léonard (Haute-Vienne), en 1778, mort à Paris en 1850.
Ancien élève de l'École polytechnique, il enseigne la chimie dans cette même école, puis au Muséum, ainsi que la physique à la Sorbonne. Il a établi la loi de dilatation des gaz à pression constante (1802) et celle des combinaisons chimiques entre gaz (1806).
Il a montré, avec Thénard, que le chlore était un corps simple et non un acide oxygéné, alors qu'on le croyait à l'époque, et découvert le bore.

GAZ : voir Fluide et les pages 24, 26, 135, 136, 138, 148, 173, 175, 196, 205, 209, 229, 234 à 235, 255, 258, 263, 265, 268, 273, 305, 312, 316, 320, 321, 323, 328, 335, 336, 338, 340, 348, 356, 357, 453, 478, 486, 490, 492, 509, 514, 516, 525, 526, 530, 531, 452, 537.

GAZ RARES (Noble gases) pages 44, 112, 113, 135, 277, 326, 345, 499.

Gaz existant en très faible proportion dans l'atmosphère. Ce sont : l'hélium (0,5 ‰), le néon (18.10^{-6} %), l'argon ($9{,}4.10^{-3}$ %), le krypton (10^{-6} %) et le xénon (5.10^{-8} %). Ils sont caractérisés par une réactivité chimique à peu près

nulle et cette inertie leur donne des applications (remplissage des ampoules à incandescence d'argon ou de krypton, soudure en atmosphère d'argon, etc.).
Les gaz rares doivent leur inertie à leur structure électronique. Leurs couches électroniques sont complètes. L'hélium n'a que 2 électrons (la couche K est ainsi saturée), les autres ont une couche externe saturée avec 8 électrons, ce qui leur confère une grande stabilité. En effet, dans ces conditions, un électron étranger ne peut trouver place sur la couche saturée.
On a réalisé malgré tout, ces dernières années, des composés du xénon, fort instables, montrant que vraisemblablement les électrons des couches plus profondes, incomplètes, peuvent participer à une liaison chimique.

GEIGER (compteur) : voir Compteurs et les pages 98, 499.

GEIGER (Hans)

Physicien allemand, né à Neustadt-an-der-Haard (Palatinat) en 1882 et mort à Berlin en 1945.
Geiger doit sa célébrité à l'invention d'un système de détection des particules énergétiques (1913), qu'il perfectionnera ensuite avec Müller (compteur Geiger-Müller). Son apport à la science est toutefois beaucoup plus vaste. Assistant de Rutherford lors des travaux de ce dernier sur la diffusion des particules alpha ♦, Geiger mesure les énergies de ces particules dans les diverses transformations radioactives et montre que l'énergie est inversement proportionnelle à la période. D'autre part, il démontre que le numéro atomique d'un élément chimique représente le nombre de charges portées par le noyau.

♦ Voir l'article : l'Atome, pages 49 et 57.

Ouvrages essentiels :
Mesures pratiques en radioactivité (Gauthier-Villars, Paris, 1919) ;
Negative und positive Strahlen zusammenhängender Materie (Springe, Berlin, 1927) ;
Haüfigkeit und Grösse der ausgedehnten Luftschauer (Verlag der Akademie der Wissenschaften, Berlin, 1941).

GELL-MANN (Murray) pages 142, 256, 297, 485.

Physicien américain, né à New York en 1929. Entré à l'université de Yale à l'âge de quinze ans, diplômé du Massachusetts Institute of Technology, Gell-Mann obtient une chaire de physique au California Institute of Technology à vingt-sept ans. Se plongeant dans le domaine des particules élémentaires, qui était devenu une véritable jungle au milieu du XXe siècle, il se penche sur le problème des mésons K et des hypérons ♦. Appliquant le « nombre d'étrangeté » à diverses particules insolites, il conclut par la conservation de ce nombre. Gell-Mann poursuit alors ses travaux en groupant les nombreux mésons, nucléons et hypérons selon certaines règles fixes. Il met ainsi en évidence la particule « oméga moins ».

♦ Voir l'article : la physique des hautes énergies: les Particules, pages 435 à 438.

GÉNÉRATEUR (Generator) pages 26, 28, 95, 170, 186, 189, 204, 250, 266, 309, 334, 348, 388, 452, 510, 515, 530, 534.

En électricité, un générateur est un appareil producteur d'énergie électrique. Les générateurs sont très variés : tous les types de piles (Leclanché, Mallory, etc.) constituent les générateurs électrochimiques (il faut inclure dans cette classe les piles à combustibles). Tous ces appareils transforment l'énergie chimique en énergie électrique. Les alternateurs ou les dynamos produisent l'énergie électrique

à partir de l'énergie mécanique du moteur qui les entraîne. D'autres générateurs sont utilisés : piles solaires utilisant l'énergie rayonnante ou générateurs M.H.D. (magnétohydrodynamiques), dans lesquels on récupère une partie de l'énergie des particules d'un plasma.
L'énergie produite peut être énorme ou très faible suivant l'utilisation du générateur, si bien qu'on pourrait généraliser notre définition pour y inclure tout appareil produisant un signal électrique dont la tension et la forme caractérisent le générateur.

GERMANIUM (Germanium)

Élément 32 de la classification périodique ♦. Sa masse atomique est 72,6. Le germanium a une importance technique considérable du fait de ses propriétés semi-conductrices, qui le font utiliser dans la fabrication de diodes ou de transistors ♦. En effet, le germanium, ayant la valence 4 comme le carbone, cristallise dans un système cubique comparable à celui du diamant. Dans son état normal, chaque atome est entouré d'un nuage électronique dont la couche externe comprend 8 électrons, 4 lui appartenant et 4, appariés aux précédents, provenant chacun d'un des 4 atomes voisins. L'agitation thermique libère un certain nombre d'électrons et crée ainsi un nombre correspondant de « trous » positifs ♦. Le germanium est alors semi-conducteur.
Les propriétés du germanium sont modifiées par le dopage qui, suivant l'impureté introduite, en fait un semi-conducteur du type *p* (dopage par l'indium) ou du type *n* (dopage par l'arsenic ou l'antimoine).

♦ Voir le tableau, pages 42 et 43.

♦ Voir l'article : l'Électronique, pages 229 à 232, et 236 à 240.

♦ Voir l'article : l'Électronique, pages 236 à 239.

GOLDSTEIN (Eugen)

Physicien allemand, né à Gleiwitz (Silésie) en 1850, mort à Berlin en 1930. Professeur de physique à l'université de Berlin, Goldstein est chargé de diriger des recherches relatives à la décharge dans les gaz raréfiés. Ses travaux révolutionnaires sur les rayons cathodiques vont dès lors le rendre célèbre. Effectuant des recherches importantes sur la diffraction électrostatique de ces rayons et sur la coloration qu'ils produisent, il est d'ailleurs le premier à donner à la luminescence produite à la cathode dans un tube sous vide le nom de « rayons cathodiques ». Utilisant une cathode perforée, il met ensuite en évidence ce qu'il appelle les « rayons canaux » (rayons traversant les canaux dans la direction opposée à celle prise par les rayons cathodiques). L'étude de ces rayons, dénommés ultérieurement « rayons positifs » par J. J. Thomson, engendrera la découverte du proton.

GRAMME (Zénobe)

Inventeur belge, né en 1826, mort en France à Bois-Colombes en 1901.
Fort peu interessé par les études, le jeune Gramme passe la majeure partie de son temps à exécuter des travaux manuels. Ouvrier puis technicien dans une société française d'appareils électriques, il vit dans une relative pauvreté et se consacre de plus en plus à la recherche en électricité. Trois inventions mécaniques, qui, toutes, portent son nom, font sa célébrité : l'anneau de Gramme, machine produisant un courant alternatif, le collecteur de Gramme, qui permet de réaliser des appareils à courant continu, et, enfin, la célèbre machine de Gramme, première dynamo industrielle, utilisable pour la production de la lumière électrique.

GRAVITATION (Gravitation) pages 100, 182, 184, 266, 279, 285, 286, 298, 311, 337, 348, 352, 421, 448, 478, 483, 518.

Newton a établi que deux corps s'attiraient mutuellement suivant une loi qui s'exprime dans la formule : $f = G \frac{mm'}{d^2}$,

où f est la force (en newtons) d'attraction, m et m' la masse (en kg) des 2 corps, d leur distance (en mètres), G étant la constante de gravitation ou d'attraction universelle, valant $6{,}62.10^{-11}$ (dans le système d'unités international ♦).

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 15.

Un cas particulier de cette loi est la pesanteur, l'attraction de pesanteur — le poids d'un corps — étant la conséquence du voisinage de la Terre.

En d'autres termes, tout objet crée autour de lui un champ de gravitation, créant ainsi, entre deux objets, l'interaction de gravitation. La conception de Newton s'applique, en termes de mécanique classique, aux objets matériels, c'est-à-dire doués de masse. La théorie actuelle relativiste du champ de gravitation est beaucoup plus large : conformément à l'équivalence masse/énergie, on doit considérer qu'un objet non matériel comme un photon est soumis à la gravitation. Cette hypothèse d'Einstein a été vérifiée lors de l'éclipse de Soleil du 29 mai 1919 qui permit de montrer la courbure des rayons lumineux sous l'action de la masse solaire.

Les recherches actuelles sur la gravitation ont pour but de mettre en évidence l'onde de gravitation, se propageant dans le vide à la même vitesse que l'onde électromagnétique, et à laquelle on pourrait associer le graviton, corpuscule qui serait, pour la gravitation, l'analogue du photon. On connaît encore peu de choses sur le graviton, sinon son spin qui serait de 2.

GRAVITON : voir Gravitation et les pages 101, 298.

GULBERG et WAAGE (Loi de) : voir Équilibre et la page 118.

H

HADRONS ♦ (Hadrons)

♦ Se reporter à l'article : la physique des hautes énergies : les Particules.

Nom sous lequel on groupe les particules ayant des interactions fortes, c'est-à-dire autres que les leptons et les photons. Feront donc partie des hadrons : les mésons, les baryons (nucléons, hypérons) et leurs antiparticules.

HAHN (Otto) page 63.

Physicochimiste allemand, né à Francfort en 1879.
Docteur ès sciences de l'université de Marburg, Hahn travaille successivement avec Ramsay, à Londres, et avec Rutherford, à Montréal. Membre puis directeur du Kaiser Wilhelm Institut de Berlin, il reçoit le prix Nobel de chimie en 1944. Se consacrant à des recherches sur les éléments radioactifs, Hahn inaugure une brillante carrière en détectant des éléments nouveaux dans la fission du thorium. Il découvre ensuite le radiothorium, le mésothorium et, en association avec Lise Meitner, le protactinium. La célébrité lui vient toutefois un peu plus tard, lorsqu'il reprend les travaux de Fermi sur le bombardement de l'uranium par des neutrons. Traitant l'uranium bombardé avec du baryum, il met en évidence, avec Strassman, la fission de l'uranium (1938). Cette découverte fondamentale, qui lui vaut le prix Nobel, ouvre la voie aux travaux sur l'énergie atomique. Prévoyant d'ailleurs l'utilisation ultérieure de sa découverte à des fins militaires, Hahn s'oppose violemment à la construction de la bombe atomique.

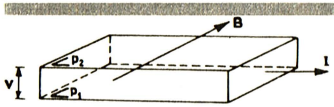
Ouvrages essentiels :
Über das Zerplatzen des Urankernes durch langsame Neutronen (W. de Gruyter, Berlin, 1939) ;
Künstliche neue Elemente, vom Unwägbaren zum Wägbaren (Verlag Chimie, Berlin, 1948) ;
Cobalt 60, *Gefahr oder Segen für diese Menschheit ?* (Musterschmidt, Göttingen, 1955)
Vom Radiothor zur Uranspaltung, eine wissenschaftliche Selbstbiographie (Vieweg und Sohn, Brunswick, 1962).

HALL (Edwin Herbert)

Physicien américain, né à Great Falls (Maine) en 1855, mort à Cambridge (Massachusetts) en 1938.
Professeur de physique à Harvard, Hall doit sa célébrité à la découverte de l'effet qui porte son nom. Le reste de son œuvre est dès lors consacré à développer cet effet et les phénomènes qui en découlent. Il est ainsi amené à faire des recherches sur la conductibilité thermique et électrique de métaux, dont l'acier.

HALL (effet) (Hall effect)

Surtout sensible sur les semi-conducteurs, l'effet Hall est une conséquence de l'action d'une induction magnétique sur les charges en mouvement dans le conducteur.
La déviation des charges en mouvement par l'induction $\vec{B}$ horizontale produit une différence de potentiel V (ou tension). Sur la figure ci-dessous, la différence de potentiel se produit entre les deux faces horizontales du bloc.



V : différence de potentiel (ou tension) entre les plans P_1 et P_2
I : tension
B : induction

HEISENBERG (Werner Karl) pages 29, 103, 110, 176, 202, 203, 276, 283, 291, 361, 409, 500, 518.

Physicien allemand, né à Würzburg en 1901.
Se lançant à dix-neuf ans dans la recherche théorique sous l'égide de grands physiciens de son époque tels que Bohr et Sommerfeld, Heisenberg élabore en 1925 un système basé sur l'algèbre des matrices et dénommé la mécanique matricielle, équivalent de la mécanique ondulatoire que Schrödinger énonce quelques mois plus tard.
Nommé alors professeur de physique théorique à l'université de Leipzig, Heisenberg formule en 1927 son célèbre principe d'incertitude, base de la mécanique quantique, qui remet en question une partie des données de la science moderne et porte un coup fatal au principe du déterminisme ♦. Le prix Nobel de physique lui est décerné, en 1932, consacrant cette grande découverte. Directeur du Max Planck Institut de Berlin, puis de Munich, Heisenberg en fait alors le centre de la recherche atomique en Allemagne.
Menant, par ailleurs, des recherches moins spectaculaires mais très poussées, Heisenberg découvre les formes allotropiques ♦ de la molécule d'hydrogène (ortho-hydrogène et para-hydrogène) et démontre que la structure du noyau est formée de protons et de neutrons maintenus ensemble par le processus des « forces d'échange ». Toutefois, c'est en 1958 qu'il énonce de nouveau une théorie retentissante, celle du « champ unifié ♦ », destinée à expliquer la structure des particules élémentaires dans l'atome.

♦ Le principe du déterminisme qui régnait dans le domaine des sciences a semblé battu en brèche, et certains commentateurs, comme le physicien anglais James Jeans, parlèrent de « liberté » de l'atome... En réalité, cette crise se solda non par un abandon, mais par une transformation de l'idée de déterminisme en microphysique. Au déterminisme absolu succéda un déterminisme statistique. Les travaux de Heisenberg modifièrent profondément l'image que l'homme se faisait de la nature physique.
♦ Voir l'article : la Chimie, page 106.

♦ Voir Théorie unitaire.

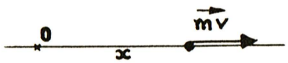
Ouvrages essentiels :
Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft (Hirzel, Leipzig, 1945) ;
La Physique du noyau atomique (A. Michel, Paris, 1954) ;
Les Principes physiques de la théorie des quanta (Gauthier-Villars, Paris, 1957) ;
Physique et philosophie (A. Michel, Paris, 1961) ;
La Nature dans la physique contemporaine (Gallimard, Paris, 1962).

HEISENBERG (Relation d'incertitude de) (Heisenberg uncertainty principle) pages 110, 276, 291, 409.

Cette relation exprime l'impossibilité de connaître simultanément avec précision la position et la quantité de mouvement d'un corps (produit de la masse par la

vitesse), donc sa vitesse. En effet, les incertitudes (erreurs maximales admises dans la mesure des grandeurs) sont liées par la relation :

$\Delta (mv)\ \Delta x \leqslant \frac{h}{4\pi}$, où h = constante de Planck ($6{,}62.10^{-34}$), $\Delta (mv)$ = incertitude sur la quantité de mouvement, et Δx = incertitude sur la position, dans le cas simple où le corps se déplace sur un axe Ox ♦.



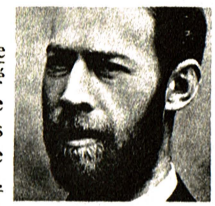
Il résulte de cette relation qu'il faut, par exemple, renoncer à décrire la trajectoire d'un électron autour d'un atome, mais se contenter de déterminer la probabilité de présence en un point donné. C'est la raison pour laquelle la notion d'orbitale ♦ s'est substituée aux trajectoires électroniques dans le modèle d'atome de Bohr. La physique a-t-elle perdu de sa rigueur en adoptant cette relation d'incertitude? Non, car la mécanique quantique, si elle ne détermine pas de trajectoires, détermine les méthodes qui conduiront, à partir de conditions données, à définir le comportement d'un système physique.

♦ Si le corps se meut dans l'espace, il est repéré par ses coordonnées x, y, z et par les projections v_x, v_y, v_z de la vitesse sur 3 axes de coordonnées O_x, O_y, O_z. On a alors 3 relations analogues à la première.

♦ Voir ce mot.

HERTZ (Heinrich) pages 97, 207, 277, 358.

Physicien allemand, né à Hambourg en 1857, mort à Bonn en 1894.
Assistant à l'université de Kiel, Hertz se penche sur la théorie électromagnétique de Maxwell et se lance dans la recherche. Professeur à Karlsruhe puis à l'université de Bonn, il énonce en 1887-1888 une théorie qui va rendre son nom célèbre dans le monde entier : démontrant que les ondes électromagnétiques présentent les mêmes phénomènes de réfraction et de polarisation que les ondes lumineuses, il prouve que l'électricité peut être transmise par ces ondes aussi rapidement que la lumière. Il établit ainsi, sans discussion possible, la nature électromagnétique de la lumière, ce qui confirme la théorie de Faraday et permettra le développement de la télégraphie sans fil.
Par ailleurs, Hertz poursuit des recherches sur la décharge de l'électricité dans des gaz raréfiés et sur les rayons cathodiques, et découvre l'effet photoélectrique. Un manuscrit posthume révèle enfin que Hertz a tenté de développer toute la mécanique à partir du principe fondamental de moindre action.


Heinrich Hertz (Viollet)

Bibliographie

Gesammelte Werke (œuvres complètes) (Barth, Leipzig, 1894-1895).

HERTZ (Hertz) pages 268, 277, 310, 318, 505.

Le hertz (Hz) est l'unité de fréquence du système international ♦. Il correspond au nombre d'oscillations effectuées par un système en une seconde.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

HERTZIENNES (ondes) (Hertzian waves) pages 180, 193, 310, 322, 359, 524, 532, 687.

Nom donné aux ondes électromagnétiques utilisées en radio ou en télévision. Elles doivent leur nom à Hertz qui étudia leur propagation. Ce sont les ondes correspondant à des fréquences comprises entre 10 000 hertz et 10 000 mégahertz.

HISTORIQUE : voir l'article pages suivantes.

Historique

L'ÉVOLUTION DES IDÉES EN PHYSIQUE

par Fernand Lot

Vers la fin du siècle dernier, il pouvait sembler que la nature avait livré ses grandes lois, dissipé son mystère au regard de la raison, si bien que l'édifice de la physique apparaissait comme une construction pratiquement achevée. Or on se trouvait à la veille de voir des chercheurs s'attaquer aux assises mêmes du monument:

— 1896: Henri Becquerel découvre la radioactivité;

— 1900: Max Planck, apercevant dans l'énergie une discontinuité fondamentale, fonde la théorie des quanta;

— 1905: Albert Einstein pose les bases de la théorie de la relativité et annonce la réintroduction en optique de l'hypothèse corpusculaire sous une forme toute nouvelle, celle des quanta de lumière;

— 1915: Einstein généralise la relativité;

— 1924: Louis de Broglie crée la mécanique ondulatoire.

Cela signifie qu'il va falloir remettre en question les idées de continu et de discontinu, de masse et d'énergie, de force et d'action à distance, de causalité et de déterminisme, d'espace et de temps, de mouvement, de vide, de substance, d'objet, de réalité... Dans l'histoire de la physique, c'est une rupture radicale qui intervient, une mutation intéressant les fondements de la pensée.

Fernand Lot, né en 1902, écrivain et journaliste, membre fondateur de l'Association des écrivains scientifiques de France. Lauréat de l'Académie des sciences et de l'Académie française, prix Blumenthal 1932 (poésie). Auteur de nombreux ouvrages de vulgarisation : *l'Empire du froid* (Hachette, Paris, 1954), *les Jeux du hasard et du génie* (Plon, Paris, 1956), *les Isotopes au service de l'homme*, préface de Pierre Auger (Unesco, 1958), *A l'assaut des secrets de la vie* (Flammarion, Paris, 1963), *Visages des grands savants* (Ed. du Sud-Albin Michel, Paris, 1963), *Jean Perrin* (Seghers, Paris, 1963), *la Forêt* (*Diagrammes*, Ed. du Cap, Monaco), *Dis, comment ça marche ?* (Hachette, Paris, 1968). Chroniqueur scientifique au *Figaro littéraire*, à *l'Éducation*, à *la Revue des Deux-Mondes*, à *Science-Progrès-Découverte*, à l'O.R.T.F.

LA RÉVOLUTION RELATIVISTE

Lorsque le prix Nobel de physique fut attribué à Einstein en 1922, l'Académie suédoise des sciences spécifia qu'il était distingué «pour la loi photoélectrique et pour son œuvre dans le domaine théorique», sans insister sur la théorie de la relativité. Celle-ci inspirait encore trop de méfiance...

Le développement de cette théorie s'est accompli en deux étapes. Le terme de « relativité » est lié au fait que le mouvement apparaît toujours comme le mouvement relatif d'un objet par rapport à un

autre, car il est impossible d'observer un mouvement quelconque par rapport à l'espace; ainsi donc, il n'existe pas de mouvement «en soi», de mouvement «absolu».
Chargé de conséquences, cet énoncé négatif (mais n'est-ce pas de même, sur un énoncé négatif: «Il n'y a pas de mouvement perpétuel», qu'est basée la thermodynamique?) conduit tout d'abord à la généralisation du principe d'inertie◆.
Il en résultera que:
— la simultanéité de deux événements n'est pas un concept invariant, la simultanéité étant relative et dépendant du système considéré;
— les dimensions des corps rigides et la durée mesurée par les horloges dépendent de leur état de mouvement: en mouvement, les corps se contractent et les horloges se ralentissent;
— la vitesse de la lumière est une vitesse limite à laquelle nul corps matériel ne saurait atteindre;
— la masse d'une particule en mouvement augmente avec sa vitesse;
— la matière et l'énergie sont équivalentes, et toute masse peut être considérée comme une condensation d'énergie, tandis que toute manifestation d'énergie peut, inversement, présenter les effets d'une masse...
Il y avait là de quoi susciter une vive réaction de la part des représentants de la physique classique! Et ce n'était pas tout: la relativité générale allait suivre.
Celle-ci doit son origine à la tentative d'expliquer un fait connu depuis l'époque de Galilée et de Newton, mais qui s'était dérobée à toute interprétation théorique: l'inertie (résistance à l'accélération) et le poids d'un corps — qui apparaissent en eux-mêmes entièrement distincts — sont mesurés par une seule et même constante, la masse, laquelle détermine le poids d'un corps dans un champ de gravité donné. La relativité générale pose un principe d'équivalence absolue entre inertie et gravitation. De ce principe découle une suite de propositions surprenantes:
— la lumière est déviée au voisinage de corps de grande masse;
— un champ de gravitation intense déplace les raies spectrales des atomes;
— les masses empêchent l'espace d'être euclidien et l'Univers possède une certaine courbure...

◆ D'après le principe d'inertie, tout corps abandonné à lui-même et soustrait aux influences extérieures demeure en repos, ou bien, s'il était en mouvement, conserve un mouvement uniforme et rectiligne.

La relativité restreinte

Einstein conçut sa théorie de la relativité restreinte à partir d'une expérience que son résultat négatif devait rendre cruciale: la célèbre expérience effectuée pour la première fois en 1881 par Michelson, au moyen de l'interféromètre◆ qu'il avait inventé, répétée avec Morley◆ en 1887. Cette expérience mettait en évidence l'inexistence d'un éventuel déplacement de la Terre par rapport à l'hypothétique éther

◆ Voir page 341.

◆ Edward Williams Morley, chimiste et physicien américain (1838-1923). Surtout connu comme collaborateur de Michelson dans ses expériences sur la lumière.

que l'on avait imaginé comme un fluide invisible, impalpable, impondérable, répandu dans tout l'espace, qui, doublant en quelque sorte celui-ci, le dotait des propriétés mécaniques qui lui manquaient pour servir de support à l'ensemble des phénomènes électromagnétiques.

Espace et temps perdent leur caractère absolu

L'expérience de Michelson◆ établissait que, relativement à la Terre, la lumière se propage à la même vitesse dans toutes les directions. L'hypothèse de l'éther n'avait plus de sens. Il fallait renoncer à la notion de mouvement absolu; le concept de simultanéité était également à reconsidérer. Sans doute, des observateurs appartenant à un même système en mouvement rectiligne uniforme parviendront-ils, en synchronisant leurs horloges par des échanges de signaux, à définir une simultanéité dans leur propre système de référence. Mais cette simultanéité ne sera valable que pour eux; des événements qui leur paraissent simultanés ne le seront pas pour des observateurs appartenant à un deuxième système de référence qui est en mouvement par rapport au premier. Aussi est-il dépourvu de sens de dire, par exemple, que «deux supernovae situées dans deux galaxies différentes ont explosé au même instant». Le sentiment que nous avons de la simultanéité d'événements distants dans l'espace est donc une impression fallacieuse, l'illusion tirant son origine du fait que, dans notre expérience quotidienne, nous ne tenons pas compte du temps de propagation de la lumière, que nous négligeons constamment d'établir une distinction entre ce qui est «vu simultanément» et ce qui «arrive simultanément», si bien que nous ne faisons aucune différence entre le «temps ici» et le «temps là-bas». En outre, deux événements qui ont lieu dans des endroits différents peuvent être considérés comme simultanés par rapport à un système de référence et séparés par un certain intervalle de temps par rapport à un autre système, tandis que deux événements accomplis au même point d'un système de référence peuvent, observés d'un autre système, être séparés dans l'espace par un certain intervalle. Or ce sont là deux propositions symétriques; on peut passer de l'une à l'autre en intervertissant les termes temps et espace. Cette symétrie a une signification profonde: espace et temps ne sont nullement indépendants, comme le pensait Newton; ils ont partie liée: ils représentent deux aspects d'un continuum homogène, à quatre dimensions, où prennent place tous les phénomènes observables: c'est l'espace-temps de Minkowski◆, qui hérite du temps et de l'espace newtoniens le caractère absolu que ceux-ci possédaient séparément et qu'ils ont perdu.

La conclusion que les intervalles d'espace peuvent être convertis en intervalles de temps conduit à une formule mathématique qui permet de définir le changement de ces grandeurs. Einstein reprend ici la formule de la transformation de Lorentz◆, lequel a admis que tout corps en mouvement se contracte dans la direction de sa vitesse. Il faut toutefois souligner qu'il s'agit ici d'une contraction de l'espace

◆ « Cinquante ans après l'expérience initiale de Michelson (1881), les tentatives les plus fines (Kennedy au mont Wilson, Joos à Iéna, Hammar à Idaho) obligent à confirmer un effet nul, malgré la réclame faite à de mauvaises manipulations dont les résultats aberrants furent bientôt reconnus faux » P. Couderc : *la Relativité.*

◆ Hermann Minkowski : mathématicien balte (1864-1909). Auteur d'une géométrie des nombres. A donné l'interprétation géométrique de la relativité restreinte en recourant à un espace doté d'une métrique particulière.

◆ Hendrik Antoon Lorentz : physicien néerlandais (1853-1928). Principal auteur de la théorie électronique de la matière.

lui-même: tous les corps matériels se déplaçant avec la même vitesse se contractent de la même façon, simplement parce qu'ils appartiennent au même espace contracté. Tout objet de longueur l, animé d'une vitesse v par rapport à l'observateur, sera contracté d'une quantité fonction de sa vitesse. La longueur mesurée sera, c étant la vitesse de la lumière:

$$l' = l\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Semblablement, tout événement se déroulant pendant un temps t, observé d'un système en mouvement relatif, durera un temps t', donné par:

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Ainsi s'expriment mathématiquement la contraction des longueurs et la dilatation du temps dans la théorie de la relativité. La vitesse v est ordinairement très inférieure à c, vitesse de la lumière, et les valeurs l et l' ne seront qu'à peine modifiées. C'est pourquoi un avion à réaction volant à 1 000 km à l'heure n'éprouve qu'un raccourcissement de l'ordre du diamètre d'un atome. Il n'en sera plus de même pour des vitesses suffisamment grandes: au fur et à mesure que v augmentera, les longueurs pourront devenir indéfiniment plus petites, les intervalles de temps indéfiniment plus grands: ce serait le cas d'une fusée dont la vitesse avoisinerait celle de la lumière — d'où le célèbre paradoxe que Langevin exposa, en 1911, au congrès de Bologne: un voyageur quitte la Terre, emporté par un astronef, avec une vitesse inférieure seulement de 1/20 000 à celle de la lumière. Il s'éloigne pendant un an, fait demi-tour et s'en revient au bout de deux ans de son temps propre mesuré par les horloges du bord. A son atterrissage, il retrouve une Terre vieillie de deux siècles: ce qui pour lui était «naguère» est, pour ses nouveaux contemporains, «autrefois»... Au cours de son voyage, l'astronaute ne s'est pas plus aperçu de la dilatation de son temps propre que de la contraction des longueurs de l'astronef et du contenu de celui-ci: l'engin, son matériel et son passager ont été, en effet, à l'échelle moléculaire et atomique aussi bien qu'à l'échelle macroscopique, comme intimement et très secrètement englués dans une même gelée retardatrice.

La vitesse de la lumière est une limite qu'aucun corps ne peut dépasser

Einstein postula que, pour un observateur placé dans un système animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme par rapport à un second système, la vitesse de la lumière dans le vide◆ est une constante universelle, rigoureusement indépendante du mouvement considéré. De ce postulat, il découle qu'aucun corps matériel

◆ 300 000 km/s environ ; d'après les plus récentes mesures : 299 792,5 ± 0,4 km/s.

ne peut se mouvoir à une vitesse égale ou supérieure à celle de la lumière. Considérons un laboratoire L en mouvement, lancé à la vitesse de la lumière c par rapport au système de référence fondamental F. Supposons que l'on place un miroir dans L pour réfléchir le rayon de lumière émis par une source au repos dans L. Par rapport à L, cette réflexion est précisément le phénomène habituel de la lumière réfléchie par un miroir au repos. Si nous supposons maintenant la source lumineuse au repos dans F, rien ne doit changer, en vertu du principe de l'invariance de la vitesse de la lumière. Pourtant, le rayon ne pourra alors jamais être réfléchi puisque, lumière et miroir voyageant tous deux dans la même direction et avec la même vitesse c, la lumière ne rattrapera jamais le miroir. On verrait donc se manifester une influence de la vitesse de L sur les phénomènes optiques qui s'y déroulent, ce qui serait une violation du principe de relativité d'Einstein, selon lequel toutes les expériences d'optique doivent donner le même résultat quelle que soit la vitesse du laboratoire. Par conséquent, si l'on admet les deux hypothèses fondamentales d'Einstein — principe de relativité en optique et principe d'invariance de la vitesse de la lumière —, il n'est pas possible pour un laboratoire L de se mouvoir avec la vitesse de la lumière c par rapport au système de référence de base F. Si cela était possible, le principe de relativité ne serait plus valable. Le laboratoire considéré étant un corps matériel comme un autre, on en vient à la proposition générale: aucun corps matériel ne peut se mouvoir à la vitesse de la lumière.

D'après la théorie de la relativité, énergie et masse sont équivalentes

Du fait qu'une vitesse limite est désormais assignée à la lumière et qu'aucun corps matériel ne peut se déplacer aussi vite qu'elle, on peut tirer une autre conséquence: plus la masse d'un corps est grande, plus il est difficile de l'arracher à son immobilité ou d'accélérer son mouvement, s'il en a déjà un. Aucun corps ne pouvant acquérir une vitesse supérieure à celle de la lumière, il nous reste à conclure que sa masse (et par conséquent sa résistance à une nouvelle accélération) doit croître d'une façon illimitée lorsque sa vitesse tend à égaler celle de la lumière. Si m_o est la masse du corps considéré à très faible vitesse, la masse m à une vitesse v est donnée par la formule, analogue aux deux précédentes:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

La masse devient infinie quand v tend vers c. La masse variant avec la vitesse, l'énergie cinétique apparaît donc comme douée de masse. La théorie de la relativité établit que toute énergie est massive. Tout corps qui rayonne de la chaleur ou de la lumière subit par conséquent une perte de masse en fonction de l'énergie qu'il perd avec

le rayonnement émis. Inversement, si l'on fournit de l'énergie à un corps — en le chauffant, par exemple —, sa masse augmentera. Est-il possible qu'une barre de fer pèse plus, portée au rouge, qu'à la température ordinaire? Aussi incroyable que cela puisse paraître, la réponse est affirmative. Il n'est cependant pas possible de le vérifier, l'accroissement étant ici trop petit pour pouvoir être mesuré directement, même en recourant à la plus sensible des balances. Pour que l'accroissement ou la diminution d'une masse soient mesurables, il faut que le changement d'énergie — apport ou perte — par unité de masse soit très grand. Cette condition se trouve réalisée dans le cas des corps radioactifs.

Ainsi, en relativité, principe de la conservation de masse et principe de la conservation de l'énergie, jusqu'alors séparés, fusionnent en un seul et même principe, qui exprime la conservation de l'énergie dans l'Univers, et la masse apparaît alors comme l'inertie même d'une certaine quantité d'énergie. La masse d'un corps au repos représente l'inertie de son énergie interne et, quand un corps se désintègre, comme dans le cas du radium, de l'uranium et des autres éléments radioactifs, l'énergie E qu'il libère est donnée par la formule célèbre: $E = mc^2$, où m est la perte de masse et c la vitesse de la lumière.

La loi de la transformation de la masse en énergie va se révéler d'une importance primordiale dans le développement des connaissances sur la constitution de l'atome, cet atome dont les particules qui le constituent, décrites par Werner Heisenberg, «sont déterminées par des exigences de symétrie mathématiques; elles ne sont plus éternelles ni invariables; c'est à peine si l'on peut leur attribuer une réalité. Elles sont bien plus l'expression des structures mathématiques radicales auxquelles on aboutit en divisant la matière en ses plus petites parties, et qui forment le contenu des lois fondamentales de la nature.◆»

◆ W. Heisenberg : *Physique et philosophie* (Albin-Michel, Paris, 1961).

Dès lors, à la question: «Qu'est-ce qu'un atome?», on ne peut que répondre avec Heisenberg: «Toutes les qualités de l'atome ne reposent que sur des interférences; aucune propriété matérielle ne saurait lui être directement attribuée. Cela revient à dire que toute représentation de l'atome que notre imagination est capable d'inventer est, de ce fait même, inadéquate. Toute intelligence du monde atomique par les moyens sensibles est impossible.»

Jean Perrin avait déjà déclaré: «Ce qui nous semblait logiquement nécessaire n'est plus qu'un anthropomorphisme puéril, et nous sommes curieusement ramenés au vieux commandement biblique attestant des réflexions après tout semblables: Tu ne sculpteras point de formes à la ressemblance de ton Dieu.◆»

◆ J. Perrin : *les Éléments de la physique* (Albin-Michel, Paris, 1930).

... Mais, au-delà de l'imaginable, la relativité poursuit ses conquêtes continûment vérifiées par l'expérience, et conduisant aux applications concrètes. Il est devenu possible de mesurer l'énergie de liaison du noyau, avec laquelle les particules sont puissamment maintenues dans

la citadelle nucléaire, en considérant l'énergie nécessaire pour arriver à libérer les particules et les écarter à une grande distance les unes des autres. En effet, Einstein nous a appris que cette énergie E, qui est produite par la formation du noyau, peut apparaître comme perte de masse due à l'agglomération des particules. Les masses des protons et des neutrons individuels ajoutés ensemble sont $\frac{E}{c^2}$ fois plus grandes que la masse du noyau où ces particules sont groupées. Par conséquent, en mesurant les masses des protons et des neutrons pendant qu'ils sont libres, et, d'autre part, la masse du noyau, on peut connaître l'énergie E. Grâce à de telles mesures, on va pouvoir classer les atomes selon la forme avec laquelle les particules nucléaires sont réunies; expliquer comment les éléments radioactifs se montrent capables d'émettre des particules lancées à de très grandes vitesses; comprendre pourquoi, lors de la formation avec dégagement de chaleur d'un noyau d'atome à partir de ses constituants, la masse du noyau ainsi formé apparaît inférieure à la masse des constituants, ce défaut de masse◆ correspondant à la masse même de l'énergie rayonnée.

◆ Voir l'article : l'Atome, pages 52 et 53.

Dans une transmutation, la synthèse d'un atome entraîne l'émission d'une énorme quantité d'énergie. Inversement, cette même quantité est requise pour démolir l'édifice atomique, et c'est pourquoi la plupart des noyaux se montrent d'une stabilité qui a défié, jusqu'ici — quelque brutalité chimique ou physique qu'ils aient pu y mettre — les efforts des expérimentateurs. Pour vaincre cette stabilité, il fallait attendre l'avènement de l'«artillerie» atomique.

Illustrée par la libération partielle de l'énergie nucléaire — par la fission, au sein de la pile atomique; par la fusion, lors d'une explosion thermonucléaire —, la relation entre masse et énergie a permis aussi de résoudre le problème, demeuré jusqu'alors profondément mystérieux, concernant les ressources énergétiques grâce auxquelles le Soleil et les autres étoiles rayonnent de façon apparemment inépuisable.

La relativité générale

La théorie de la relativité restreinte avait admis que rien ne permet de distinguer un système de référence d'un autre, du moment qu'il s'agit de systèmes galiléens, c'est-à-dire en mouvement rectiligne uniforme et n'ayant, par conséquent, aucune accélération ni aucune rotation.

En relativité, inertie et gravitation sont synonymes

Einstein fut amené à se demander comment les états de mouvement de certains systèmes de référence pouvaient se distinguer des états de mouvement d'autres systèmes de référence, et quelle pouvait être la raison d'une telle distinction. S'il était possible de répondre à une

telle question, on pourrait alors généraliser la relativité, en l'étendant à tous les observateurs de tous les systèmes de référence imaginables, bien que, le plus souvent, ceux-ci n'apparaissent pas comme équivalents: accélérations, rotations nous introduisent, hors des systèmes galiléens, dans celui des mouvements variés. Si, à l'intérieur des systèmes galiléens, rien n'indique à l'observateur qu'il se trouve en mouvement, car il manque de repères extérieurs et son véhicule se déplace sans secousses, dans les autres systèmes se manifestent des forces d'inertie — celles-là dont nous connaissons bien les effets, quand, en voiture nous accélérons, prenons un virage ou donnons un coup de frein brutal. Einstein conclut alors à l'équivalence de l'inertie et de la gravitation; il s'agit d'une seule et même chose, laquelle trouve son origine dans une perturbation de la structure même de l'espace. Telle est l'interprétation de l'identité de la masse pesante, relative à l'attraction de la matière par la matière, et la masse inerte, qui a trait à la résistance de la matière en mouvement.
Outre le principe de l'équivalence entre l'inertie et la gravitation, la relativité générale a deux autres principes de base: le principe de covariance, obligatoire pour toute théorie physique, car le contenu des lois doit être le même, quel que soit le choix des variables indépendantes qui a été fait, et le principe de Mach, qui énonce que «le système de coordonnées ne peut être déterminé que par les corps de l'Univers», d'où il ressort que l'énergie d'un corps est déterminée par la distribution de toutes les masses de l'Univers, ce qui, pour Einstein, devient l'hypothèse générale selon laquelle la géométrie de l'espace est déterminée par la distribution de matière et d'énergie. Une particule matérielle ne se meut pas en mouvement non accéléré par rapport à l'espace, mais par rapport au centre de toutes les autres masses de l'Univers. Ainsi, il ne peut y avoir d'inertie de la matière par rapport à l'espace, mais seulement par rapport à la matière. Par conséquent, si un corps est éloigné suffisamment de toutes les masses existantes, son inertie doit être réduite à zéro.
La gravitation cesse dès lors d'être une «force d'attraction», une «action instantanée à distance», pour devenir une forme de l'inertie. On peut maintenant comprendre pourquoi la masse pesante et la masse inerte d'un corps sont identiques: elles le sont par définition, la pesanteur étant un effet de l'inertie.
Un champ de gravitation, c'est une déformation de l'espace-temps qui se propage avec la vitesse de la lumière, produite par un corps massif. Le Soleil s'entoure ainsi d'un champ gravitationnel qu'il crée à la manière dont un aimant suscite un champ magnétique, et les trajectoires elliptiques des planètes représentent les itinéraires propices de l'espace-temps, modifié par la masse solaire, selon les lois d'une géométrie non euclidienne.
Henri Poincaré◆, considérant l'antique géométrie d'Euclide comme la plus commode de toutes les géométries possibles, construites à

◆ H. Poincaré : *la Science et l'hypothèse* (Flammarion, Paris, 1909).

partir d'autres postulats, n'hésitait pas à avancer qu'en cas de conflit avec l'expérience physique on préférerait toujours modifier la théorie physique plutôt que de renoncer à la géométrie classique.

La relativité générale préfère l'espace de Riemann à celui d'Euclide

Or il s'est révélé que, pour l'interprétation des théories de la relativité générale, l'espace riemannien◆ s'est justement trouvé «plus commode» que l'espace euclidien. En relativité générale, nous devons admettre que par un point il est impossible de mener une parallèle à une droite, ce qui entraîne, entre autres, que la somme des angles d'un triangle est toujours supérieure à la somme de deux angles droits. Notion d'une importance capitale: l'espace riemannien comporte une certaine courbure.

◆ Bernhard Riemann : mathématicien allemand (1826-1866). Son œuvre concerne les domaines des fonctions de variables complexes (« surfaces de Riemann »), des fonctions abéliennes, des nombres premiers, des dérivées partielles du second ordre. Il a inspiré la plupart des travaux entrepris dans le domaine des géométries non euclidiennes.

Depuis Newton, la loi de l'inverse du carré des distances est restée le type même de la loi d'action à distance◆. Le champ de gravitation newtonien, dans lequel peut être décrit avec une précision suffisante — dans la plupart des cas — le mouvement des planètes, ne fait pas intervenir le temps. Il implique l'existence d'une télé-action instantanée. En d'autres termes, le champ se propage à une vitesse infiniment grande, ce qui avait gêné Newton lui-même.

◆ La loi de l'attraction universelle, formulée par Newton, a été tirée de la remarque que, d'après les lois de Kepler, la force agissant sur chaque planète est dirigée vers le Soleil et varie proportionnellement à la masse et en raison inverse du carré de la distance de la planète au Soleil.

Seule la relativité générale pouvait vaincre cette difficulté en dotant l'espace-temps d'une courbure qui fait apparaître le champ gravitationnel comme une propriété géométrique de l'Univers. La gravitation universelle est la manifestation physique de la courbure déterminée par la présence de matière et qui peut se calculer à partir de la distribution de celle-ci: si la courbure est connue, c'est-à-dire si l'on connaît le champ de gravitation, on saura quel est le mouvement d'un corps présent dans ce champ.

L'espace riemannien est un espace courbe quadridimensionnel

Mais comment «réaliser» pareille courbure? On peut tenter de recourir à des analogies. Nous sommes habitués à vivre dans un monde euclidien, où la ligne droite est le plus court chemin d'un point à un autre et où la meilleure matérialisation que nous puissions donner d'une ligne droite est un fil tendu. Mais celui-ci, même très tendu, forme une courbe appelée chaînette. Si le fil est court, on peut en douter; dès qu'il est suffisamment long, la chaînette se manifeste et si l'on tente de la réduire en exerçant une traction plus forte sur le fil, il se rompra.

Autre exemple: une crevette, chez qui l'on a substitué de la limaille de fer aux otolithes◆ contenus dans son appareil sensoriel d'équilibration, se trouve contrainte, placée dans un champ magnétique, de s'orienter suivant les lignes de force de ce champ. Si ces lignes de force sont incurvées, la plus courte distance d'un point à un autre sera alors, nécessairement, pour le crustacé, une ligne courbe...

◆ Otolithe : minuscule concrétion calcaire existant dans l'appareil auditif de divers animaux.

Toutes particules, comme tous corps célestes, sont pareillement dans l'impossibilité de suivre une ligne droite ; des trajectoires incurvées leur sont imposées, de par la texture même de l'espace-

temps à quatre paramètres de la relativité générale, où il faut recourir aux coordonnées curvilignes de Gauss, les trois axes de Descartes, seulement valables pour l'espace euclidien, ne pouvant plus servir. Einstein suppose ainsi que, dans l'espace-temps courbé, les planètes suivent nécessairement les chemins quadridimensionnels les plus courts. Il n'aura plus dès lors qu'à en calculer les conséquences mathématiques pour rendre compte du déplacement, demeuré inexpliqué, du périhélie◆ de Mercure.

Pour donner une description adéquate des phénomènes dans l'espace non euclidien à quatre dimensions, un autre instrument était nécessaire: l'analyse tensorielle◆ ou calcul différentiel absolu. La théorie relativiste exige, en effet, que les lois de la nature, indépendantes de tout système de référence, se traduisent par des expressions tensorielles.

Ici, on peut s'interroger sur le fait que tel ou tel processus de généralisation mathématique formelle puisse conduire à des applications en physique, fait qui surprend davantage encore dans le cas présent où une géométrie qui passait pour inutilisable est tout à coup employée avec succès. La spéculation pure, indépendante de toute donnée objective, se trouverait donc secrètement liée au réel?

◆ Périhelie : point de l'orbite d'une planète le plus voisin du Soleil (le point le plus éloigné est dit aphélie).

◆ L'analyse tensorielle porte sur les tenseurs, grandeurs mathématiques à plusieurs composantes définies dans le cadre de la géométrie affine (on désigne par affine ou linéaire la géométrie des propriétés invariantes par les correspondances point par point dites linéaires, c'est-à-dire par des transformations du premier degré et caractérisées par le fait qu'elles conservent rectilignité et parallélisme).

Un outil de plus en plus indispensable aux physiciens: les mathématiques

A cela, on peut répondre que le réel et l'esprit humain ont un dénominateur commun: la «nature des choses». La même racine invisible unit le monde physique et le monde de la pensée abstraite, la même sève nourrit celui-ci et celui-là — ce que le physicien vérifie quand le mathématicien débouche soudain à son côté, en lui offrant l'outil dont il avait besoin. Georges Darmois◆ parle de cette «cohérence», de «cette admirable et mystérieuse correspondance» qui font que «les problèmes de la pensée sont les problèmes du monde»◆.

Eric Temple Bell observe que nombreux sont les domaines des mathématiques qui n'ont pas encore trouvé d'application dans la science. «S'il nous est permis d'extrapoler l'expérience du passé, dit-il, une large portion de cet immense trésor d'abstractions trouvera un jour ou l'autre son emploi dans l'exploration de la nature◆.» Profondément servie par les mathématiques, la relativité a suscité en retour de multiples études consacrées aux divers espaces susceptibles d'intervenir en physique, et c'est ainsi que les mathématiciens continuent de livrer aux physiciens des instruments qui, quelle que soit leur étrangeté, ont prise sur les phénomènes. A ce sujet, André Lichnerowicz◆ déclare: «La frontière entre la quantité et la qualité, entre le nombre et ce qui n'est pas nombre, est en train de s'effacer. La mathématique topologique n'est plus quantitative. Ainsi, ce n'est pas le monde qui apparaît, incompréhensiblement, comme amoureux du nombre; c'est la mathématique qui, s'assouplissant, devient de plus en plus semblable aux méandres et foisonnements du monde.

◆ Georges Darmois : mathématicien français (1888-1960). Ses travaux ont été d'une exceptionnelle importance dans le domaine du calcul des probabilités et de ses diverses applications statistiques.

◆ G. Darmois : « la Gravitation et la pensée d'Einstein », in la revue *l'Astronomie* (juillet - août 1955).

◆ E.T. Bell : *la Mathématique, reine et servante des sciences* (Payot, Paris, 1953).

◆ A. Lichnerowicz : mathématicien français (né en 1915), professeur de physique mathématique au Collège de France.

Jadis, il n'y avait qu'une mathématique, de sorte que son accord avec l'Univers semblait miraculeux. Aujourd'hui, la mathématique s'est ramifiée à l'infini, elle est devenue une jungle luxuriante de calculs et de théories. Il y a dans ces théories buissonnantes de quoi expliquer une foule de mondes bien différents du nôtre. L'accord entre la pensée et la réalité cesse d'étonner, si nous avons de quoi expliquer une infinité de réalités possibles.◆»

◆ A. Lichnerowicz, in *le Figaro littéraire* (28 mai 1960).

LA RÉVOLUTION DES QUANTA

Bien que riche de conséquences, la relativité a été moins fondamentalement révolutionnaire que la théorie des quanta; cela est dû au fait que la relativité avait ses racines dans la physique classique.

En 1900, la publication de Max Planck sur la répartition de l'énergie rayonnante du corps noir◆ portait un grand coup à la physique classique. Les prévisions de Max Planck conduisaient, en effet, à établir une courbe, exprimant cette répartition d'énergie, qui était non seulement en complet désaccord dans la région de l'ultraviolet avec celle que donnait l'expérience, mais absurde, car elle attribuait une valeur infinie à l'énergie totale du rayonnement enfermé dans le corps noir.

◆ Le type classique de *corps noir* consiste en une enceinte noircie intérieurement et percée d'un petit trou. Cette enceinte absorbe intégralement tout rayonnement reçu sur sa surface. Le pouvoir émissif d'un corps noir est pris comme base de comparaison pour déterminer les pouvoirs émissifs des autres corps.

Planck recourait à l'hypothèse selon laquelle l'émission d'énergie rayonnante ne pouvait s'effectuer que de façon discontinue, par quanta. Si la fréquence d'une onde est ν◆, elle ne pouvait être émise par la matière qu'avec une énergie multiple d'un certain quantum d'énergie $E = h\nu$, où h est une constante universelle, la constante de Planck, dont la valeur est si petite ($6{,}62.10^{-34}$ joule par seconde) qu'à notre échelle les phénomènes semblent continus.

◆ Voir Alphabet grec, page 16.

Natura facit saltus◆*!*

Cela parut proprement invraisemblable. La théorie de Planck menaçait, en effet, la théorie électromagnétique de la lumière, basée sur la notion de continuité. Il paraissait impossible de concilier l'onde lumineuse avec ces atomes d'énergie. Planck lui-même en convenait. Or, en cette même année 1900, Einstein, étudiant l'effet photoélectrique, découvre l'existence des photons: la lumière présente un caractère corpusculaire, elle se manifeste par quanta.

◆ « La nature fait des sauts », contrairement à l'aphorisme de Leibniz : « Natura non facit saltus », qui exprime que les phénomènes naturels ne peuvent varier que selon des lois n'introduisant aucune discontinuité.

En présence de ces phénomènes absolument nouveaux et de prime abord inexplicables, on va commencer par transposer dans le monde microscopique des modèles empruntés au monde macroscopique.

L'atome, modèle réduit du système solaire

C'est ainsi que Jean Perrin imagine en 1901 un modèle d'atome analogue au système solaire, le noyau, positivement chargé, jouant le rôle de l'astre central, et les électrons, particules négatives périphériques gravitant à des distances relativement immenses, celui de planètes.

Ernest Rutherford reprend la conception de Perrin et, après avoir étudié la déviation des particules alpha dans une lame mince (1911), il donne un modèle plus élaboré de l'atome. Il établit qu'un atome de nombre atomique N est constitué d'un noyau portant N charges positives, entouré de N électrons négativement chargés; que la plus grande partie de la masse est concentrée dans le noyau; que ce sont les électrons périphériques qui confèrent aux atomes leurs propriétés chimiques et non le noyau. On reste dans la «légalité».

Cette conception se montre un temps satisfaisante. Elle semble, en effet, pleinement justifiée par le fait que l'on retrouve ici les lois simples de l'attraction et de la répulsion. La force de l'attraction coulombienne◆, qui maintient sur son orbite l'électron planétaire, diminue de façon inversement proportionnelle aux carrés des distances. Autrement dit, l'électron gravite selon les lois de Kepler◆, il obéit à la loi de Newton. Ainsi, «la description de ce système devait être un parfait exemple de dynamique newtonienne intelligible dans ses moindres finesses à l'aide des découvertes du XIXe siècle sur le comportement des particules chargées en mouvement et sur le rayonnement électromagnétique produit par leur accélération»◆.

Mais il n'en était rien...

Il n'en était rien parce que, si l'atome d'hydrogène — que l'on a considéré en premier lieu parce qu'étant le plus simple de tous: un proton, un électron — représentait un système planétaire, l'orbite de son électron devait être plus ou moins allongée ou arrondie; partant, ni sa dimension ni ses propriétés ne devaient être constamment les mêmes; il devait se modifier à la suite d'une perturbation. Puisqu'il se déplaçait sur une courbe, l'électron devait, d'après la théorie de Maxwell-Lorentz, émettre un rayonnement électromagnétique; il devait par conséquent perdre de l'énergie et décrire des ellipses allant se rétrécissant très rapidement: en moins d'un millionième de seconde, l'atome devait infiniment se rapetisser, cependant que la couleur de la lumière irradiée, déterminée par la période de révolution, varierait d'instant en instant.

Or les atomes d'hydrogène non perturbés demeuraient stables et invariables, ils n'émettaient pas le moindre rayonnement électromagnétique, et quand, perturbés, ils produisaient une radiation, la couleur de celle-ci n'était pas quelconque et continue, mais coïncidait avec les raies bien définies du spectre de l'hydrogène.

Inadmissibles contradictions, que Niels Bohr va lever en faisant appel à Max Planck.

Dans sa théorie de l'atome d'hydrogène (1913), Niels Bohr part de la représentation planétaire de l'atome, mais celle-ci va singulièrement changer de figure. Il postule que, lorsqu'un électron décrit une orbite circulaire autour du noyau, la valeur absolue du moment cinétique est un multiple entier de la quantité $\frac{h}{2\pi}$, h étant le

◆ Coulombien : qui a rapport aux forces électrostatiques s'exerçant entre deux charges électriques. Ces forces suivent la loi de Coulomb.

◆ Lois de Kepler : lois du mouvement des planètes autour du Soleil : les planètes décrivent autour du Soleil des orbites planes, elliptiques, dont le Soleil occupe un des foyers ; les aires décrites par les rayons vecteurs sont proportionnelles aux temps ; les carrés des temps des révolutions planétaires sont proportionnels aux cubes des grands axes des orbites.

◆ R. Oppenheimer : *la Science et le bon sens* (Gallimard, Paris, 1955).

quantum d'action. L'électron ne peut donc tourner autour du noyau que sur une des orbites répondant à cette condition; toutes les autres orbites lui sont (mystérieusement) interdites. Il pose ensuite que la circulation d'un électron sur une orbite stable ne s'accompagne d'aucune émission d'énergie, celle-ci ne pouvant avoir lieu que lorsque l'électron saute d'une orbite stable sur une autre orbite stable de moindre énergie. Voici l'atome astreint à ne pouvoir jamais changer d'état que d'une façon discontinue, ce qui signifie qu'il ne peut exister que dans des états stationnaires discontinus, l'état à plus basse énergie étant son état normal, dans lequel il finit toujours par retomber après n'importe quel choc ou interaction due à une liaison chimique, d'où son étonnante stabilité. Ainsi peut-on s'expliquer que l'atome émet des raies spectrales et ne peut engendrer qu'une lumière déterminée, caractéristique de chaque élément, *sui generis*. Toute raie spectrale provient d'une transition entre deux niveaux d'énergie de l'atome. S'il n'y avait pas de sauts brusques des électrons d'une orbite à une autre, on n'observerait donc pas de raies. On peut donc conclure que les lois de l'électromagnétisme ne s'appliquent plus à ses constituants.

Arnold Sommerfeld retouche alors l'atome de Bohr. Il passe de la trajectoire de l'électron, supposée circulaire, aux trajectoires elliptiques, qui sont les plus générales, et auxquelles il applique la procédure de la quantification. Puis — événement mémorable — il fait intervenir la relativité, qui rejoint ainsi les quanta: la vitesse des électrons sur leur orbite est telle (de l'ordre de 1 000 km/s) qu'on doit prendre en considération les variations de masses prévues par Einstein. C'est ainsi qu'il réussit, en 1918, à prévoir, avec une précision extrême, l'emplacement des composantes en quoi se séparent souvent les raies dans le spectre de l'hydrogène: on pénètre ainsi avec Sommerfeld dans leur structure fine.

La lumière a deux aspects: corpusculaire et ondulatoire

Une question importante, cependant, est restée en suspens: si la lumière manifeste, lors de sa propagation dans l'espace, toutes les propriétés d'un mouvement ondulatoire, comment se fait-il que tous les processus — tel l'effet photoélectrique —, au cours desquels elle se trouve en réaction avec les atomes, se déroulent comme si elle était constituée de corpuscules?

La lumière ne peut être un phénomène à la fois corpusculaire et ondulatoire. En posant ce dilemme, on oublie que le physicien n'a pas à dire ce que la lumière est *en soi;* son rôle consiste seulement à énoncer les lois qui en définissent et permettent d'en prédire les phénomènes, et à déclarer en l'occurrence qu'il est nécessaire, selon les phénomènes observés, de recourir à une description mathématique exprimant tantôt le mouvement ondulatoire, tantôt le mouvement corpusculaire. Deux aspects d'une réalité cachée. Voyez ce livre dont vous affirmez qu'il est noir ou rouge selon que vous regar-

dez le dos ou la tranche, ou bien cette cuillère, concave à vos yeux et convexe pour votre voisin de table. Mais il nous est impossible de concevoir sous quel angle de vision peut être observé un quantum de lumière pour qu'il apparaisse soit comme un grain, soit comme une ride étendue. A la physique mathématique d'y voir clair!

Sa prise de position va être celle de Louis de Broglie qui fonde, en 1924, la mécanique ondulatoire, dont Erwin Schrödinger ajuste peu après l'appareil mathématique, et suivant laquelle les photons et toutes les autres particules en mouvement sont douées de propriétés ondulatoires, théorie qui reçoit dès 1927 une éclatante confirmation lorsque Davisson◆ et Germer◆ réussissent à diffracter un faisceau d'électrons à travers une lame cristalline (application immédiate: le microscope électronique). Il existe ainsi des «ondes de matière». Comme la lumière, la matière présente donc aussi une double nature.

Et c'est la seconde révolution des quanta, à partir de laquelle peut être interprété le spectre des atomes complexes, pour le déchiffrement desquels les formulations de Bohr se révèlent insuffisantes, révolution à laquelle participe, par des voies mathématiques toutes différentes, Werner Heisenberg, qui invente la mécanique des matrices, perfectionnée par Born◆ et Jordan◆, étendue par Dirac. Mécanique ondulatoire et mécanique des matrices: théories parallèles dont Schrödinger démontre qu'elles ont, foncièrement équivalentes, le même contenu physique, et qui s'épanouissent alors dans la mécanique quantique, d'une fécondité prodigieuse. «C'était, écrit Georges Gamow, comme si l'Amérique avait été découverte en même temps par Christophe Colomb en traversant l'Atlantique d'est en ouest et par un Japonais aussi audacieux, qui aurait traversé le Pacifique d'ouest en est.◆»

Mais nous voici maintenant en présence — si l'on ose dire — d'une absence: l'irreprésentabilité des processus individuels. Les phénomènes dont nous pouvons être témoins résultent d'effets statistiques.

◆ Clinton Joseph Davisson : physicien américain (1881-1958). A découvert avec Germer la diffraction d'un flux d'électrons projectés contre un cristal. A étudié les radiations thermiques et l'optique électronique.

◆ Lester Halbert Germer : physicien américain. A vérifié avec Davisson la théorie de la mécanique ondulatoire.

◆ Max Born : physicien allemand (né en 1882). Auteur de retentissants travaux en relativité et en mécanique quantique.

◆ Pacual Jordan : physicien allemand (né en 1902). Travaux sur l'électrodynamique, la relativité générale, l'astrophysique, la cosmologie et la biosynthèse, à partir desquels il a élaboré une théorie de la connaissance.

◆ G. Gamow : *Trente années qui ébranlèrent la physique* (Dunod, Paris, 1968).

Les relations d'incertitude conduisent à abandonner la notion de trajectoire

En 1927, Heisenberg introduit les relations d'incertitude en microphysique. Elles signifient qu'il est impossible de préciser simultanément la position et la vitesse d'un corpuscule. Lorsqu'on veut mesurer des quantités de plus en plus petites, il arrive un moment où les perturbations produites par une opération de mesure deviennent comparables aux grandeurs en question. La mesure nous renseigne donc sur ce qui se passe après la perturbation, non sur ce qui se serait passé sans notre intervention. Se propose-t-on de localiser un électron, par exemple, il est nécessaire de diriger sur lui un photon. Or le choc du photon sur l'électron a pour effet de communiquer à celui-ci une vitesse dont il est impossible de prévoir exactement la direction et la valeur. On ne peut que déterminer la probabilité

de l'évolution — et la notion de trajectoire d'un corpuscule, entre autres, est à abandonner. Ainsi, la connaissance des phénomènes dans le monde microscopique ne peut-elle être à la fois exacte et complète. L'introduction du discontinu en mécanique a substitué au déterminisme absolu de la physique classique un déterminisme statistique qui ne permet de calculer que des probabilités, la probabilité qu'a, par exemple, un électron d'être à tel instant en tel lieu plutôt qu'en tel autre; et la mécanique quantique a fourni une interprétation de ces principes en introduisant une fonction d'ondes, qui traduit ces probabilités en langage mathématique.

Par ailleurs, avec le principe d'exclusion énoncé par Pauli en 1925, est apparue une autre notion sans équivalent à l'échelle ordinaire, celle d'indiscernabilité; ce principe postule que deux électrons ne peuvent se trouver dans un état identique: parmi les nombres quantiques◆ qui décrivent leurs mouvements, l'un au moins doit avoir une valeur différente pour l'un ou l'autre des deux électrons. Utilisé d'abord pour rendre compte des propriétés des atomes complexes, ce principe a été étendu à toutes les particules qui, comme l'électron, possèdent un spin demi-entier.

◆ Un nombre quantique est la valeur prise par une quantité physique quantifiée dans un système corpusculaire. Celui-ci est défini par un ensemble de nombres quantiques qui fixent son « état », c'est-à-dire son énergie, son moment angulaire, son spin, etc.

Pendant une vingtaine d'années, les physiciens ont pu penser qu'il était impossible d'harmoniser à la base les deux grandes théories nées toutes deux d'un problème d'optique, la constante universelle d'Einstein, *c*, et la constante universelle de Planck, *h*, ne paraissant pas devoir appartenir à la même assise fondamentale.

Ce n'était là qu'un malentendu; le conflit de la relativité et des quanta s'est apaisé avec l'apparition réconciliatrice de la théorie des champs quantifiés sous une forme explicitement relativiste, «monument de géométrie quadridimensionnelle» et «monument partout frappé à l'écusson des constantes *c* et *h* entrelacées, que le déroulement des équations répète inlassablement»◆.

◆ O. Costa de Beauregard : *la Notion de temps* (Hermann, Paris, 1963).

LA SOCIÉTÉ DES PARTICULES

Hier encore, quelle que fût l'échelle considérée, on tenait pour valable le principe de similitude, principe intuitif qui autorisait Pascal à concevoir qu'un ciron◆ pouvait offrir «dans la petitesse de son corps des parties incomparablement plus petites, des jambes avec des jointures, des veines dans ces jambes, du sang dans ces veines, des humeurs dans ce sang, des gouttes dans ces humeurs...», et ainsi de suite, des structures semblables s'emboîtant indéfiniment les unes dans les autres comme les poupées russes. Il suffisait, pour les découvrir, d'obtenir des grossissements de plus en plus amplifiés...

◆ Nom donné à un animal minuscule tel que l'acarien du fromage.

La physique théorique doit abandonner toute image concrète

Mais on s'aperçut que la similitude cessait d'être valable à partir du moment où l'on changeait d'échelle d'observation, que l'infiniment petit n'était pas une réduction homothétique de l'infiniment grand,

et que, les corps microscopiques n'étant donc pas de simples modèles réduits des corps macroscopiques, ils ne relevaient pas des mêmes mesures. Les concepts d'espace et de temps eux-mêmes ne valaient que pour la tranche de réel où l'esprit humain les avait formés. Il était alors dépourvu de sens de parler d'images observées sous une optique dont le pouvoir séparateur serait, par exemple, un milliard de fois celui avec lequel nous voyons les images ordinaires. «S'il en était ainsi, nous finirions par être empêchés d'imaginer des structures de plus en plus fines. Comment imaginer, en effet, des objets dépouillés de tout ce qui était pour nous le signe d'une réalité? Le substratum profond, trop différent de ce que nous pouvons percevoir, échapperait ainsi à toute représentation. Et c'est bien ce à quoi s'est heurtée la physique théorique moderne, de plus en plus forcée d'abandonner toute image spatio-temporelle, et de raisonner sur des formes mathématiques. Etres rationnels exprimant des propriétés réelles, mais si différentes de celles que saisissent nos sens qu'elles sont exactement inimaginables.◆» Cela ne s'oppose pas aux progrès de la physique, les structures cachées pouvant être caractérisées par les réactions qu'elles manifestent sous tel ou tel moyen d'action.

◆ J. Perrin : *A la surface des choses* (Hermann, Paris, 1940).

On peut définir la physique classique comme étant celle qui a établi ses lois à partir des expériences menées dans le monde macroscopique, et la physique moderne comme étant celle qui a établi les siennes — radicalement différentes — à partir de l'étude du monde microscopique.

La physique moderne est obligée d'utiliser des concepts qui, s'ils ont un sens précis en termes de symboles mathématiques, ne sont pas interprétables en termes concrets. «La physique contemporaine est donc à peu près inintelligible à celui qui l'aborde du dehors, non parce que les physiciens ne s'embarrassent pas de représentations compréhensibles, mais parce que son étrangeté tient à l'objet même d'une recherche qui ne souffre pas la représentation concrète. Cela ne va pas sans permettre d'établir un curieux parallèle entre la physique et l'art modernes. Ce dernier n'est-il pas en voie de renoncer à tous rapports avec le monde objectif en révélant des expériences vécues qui échappent à toute représentation objectale?◆» Il reste que les lois insolites qui gouvernent le monde microscopique n'infirment en rien les lois de la physique classique: celles-ci conservent une entière validité dans leur domaine propre, qui est le monde macroscopique en dehors duquel elles ne sont plus recevables.

◆ A. March : *la Physique moderne et ses théories* (Gallimard, Paris, 1965).

Les particules dites « élémentaires » ne sont pas aussi élémentaires qu'on aurait pu le croire

Ainsi sont en dehors de toute représentation intuitive les protons, neutrons et électrons constituant l'atome, de même que le photon et que toutes les autres particules découvertes par la suite. Ces diverses particules apparaissant comme les ultimes unités de la matière, elles furent d'abord qualifiées d'élémentaires ou de fon-

damentales, c'est-à-dire non décomposables en parties, inanalysables. Mais il a fallu reconsidérer cette élémentarité. Le neutron, par exemple, n'est stable qu'au sein du noyau atomique. Expulsé du noyau, il se détriple spontanément, au terme d'une vie moyenne d'un quart d'heure, en un proton, un électron et un neutrino, ce dernier capable de traverser à la vitesse de la lumière d'énormes épaisseurs de matière: des millions de kilomètres de plomb, par exemple... Peut-on donc considérer le neutron comme étant composé de trois particules? Non, car le proton, de son côté, peut, dans certaines circonstances, se transformer en un neutron, un positron et un antineutrino. Quant aux mésons et aux hypérons, ils apparaissent encore plus instables que les neutrons: leur vie moyenne est d'un dix-milliardième de seconde. Ces particules sont responsables des forces agissant à l'intérieur des noyaux dont ils assurent la cohésion, en s'opposant aux forces coulombiennes de dispersion◆.

◆ Répulsion électrique qui tend, elle, à écarter les uns des autres les protons, puisqu'ils sont tous positivement chargés.

Ces particules invisibles se distinguent les unes des autres par certaines caractéristiques. Guidés soit par des résultats expérimentaux, soit par des développements théoriques, les microphysiciens ont été amenés à introduire, à côté des notions de masse, de charge et de spin, celles de spin isotopique◆, de nombre baryonique, d'hypercharge et de nombre d'étrangeté.

◆ Voir ce mot et l'article : la physique des hautes énergies : les Particules, page 415.

L'étude expérimentale des particules a permis de constater que, dans toutes les transformations qu'elles subissent, l'énergie, l'impulsion, le moment angulaire, la charge électrique (quand elles en ont une) sont fidèlement conservés: selon les prévisions d'Einstein, énergie et masse apparaissent équivalentes, parce que l'énergie de transformation correspond toujours à la variation de la masse de la particule qui se modifie.

Les antiparticules

La découverte de la première antiparticule date de 1932. Il s'agit de l'électron positif, l'anti-électron qu'avait prévu Dirac, et qui fut observé pour la première fois par Carl Anderson◆. Les vues de Dirac représentent ici un exemple de l'extrême audace intellectuelle qui caractérise les théoriciens modernes. La théorie par laquelle il avait donné à la mécanique ondulatoire sa forme relativiste supposait, paradoxalement, des «états d'énergie négative». Il interpréta ces états en imaginant l'existence d'un électron positif.

◆ Carl David Anderson : physicien américain (né en 1905). A montré que le rayonnement peut se transformer intégralement en électricité. Ses études sur les rayons cosmiques aboutirent, en 1932, à la découverte de l'électron positif et, en 1937, à observer dans le groupe « dur » de ces rayons l'existence de mésons.

La « mer de Dirac »: un exemple de théorie « extravagante »

Au premier abord, cette théorie put paraître fantaisiste. Dirac proposa, pour la rendre concevable, d'imaginer un espace absolument vide, empli, en réalité, par une infinité d'électrons négatifs, d'électrons «ordinaires», uniformément distribués dans les états quantifiés négatifs particuliers qui, selon la théorie des électrons négatifs, appartiennent au vide absolu.

L'espace vide devenait ainsi comparable à une salle archicomble dans laquelle il n'y a plus une seule place disponible. Nous ne saurions apercevoir la multitude électronique présente, car elle demeure inobservable en sa rigoureuse homogénéité. Par contre, s'il surgit un électron en surnombre, il sera alors possible de l'observer, car il sera nécessairement laissé «au-dehors» et individualisé. Supposons maintenant que, quelque part dans la foule des électrons négatifs, une de ces particules manque. Il y aura alors un trou à la place qu'elle occupait, c'est-à-dire une absence de charge négative. Or cette absence se manifestera, au milieu de l'ensemble des électrons, comme une particule positivement chargée, une particule en mouvement, comme toutes les particules observables, car le trou en question voyage; dès qu'un électron voisin remplace l'électron manquant, un nouveau trou apparaît, qu'un autre électron ne manquera pas de combler aussitôt en laissant vacante sa propre place, et ainsi de suite... On peut comparer le trou à une bulle dans l'eau, une bulle qui, elle aussi, représente une petite lacune en circulation, seule visible dans le milieu transparent où elle se déplace. Si l'électron extérieur précédemment évoqué occupe le trou, le voici escamoté du coup, car il rentre dans l'ordre de l'homogénéité générale, dans l'inobservable «mer de Dirac».
Pour le physicien qui aura pu observer à la fois le trou et l'électron extérieur qui va occuper ce trou, tout se passe comme s'il assistait à la soudaine annihilation mutuelle d'un électron positif et d'un électron négatif. L'énergie libérée dans la chute de ce dernier sera émise sous forme d'une radiation de haute fréquence. Si une puissante radiation extérieure — des rayons gamma très énergétiques — pénètre dans l'empilement des électrons, elle sera capable d'en expulser un, et le physicien observera, cette fois, le phénomène inverse: l'apparition d'une paire d'électrons de signes contraires, c'est-à-dire l'électron négatif expulsé et le trou-positron au milieu des électrons négatifs.

La théorie de Dirac parut si incroyable que son auteur lui-même, ébranlé par le scepticisme général, faillit douter de sa valeur. Elle devait cependant recevoir la plus mémorable des confirmations expérimentales quand Anderson, en étudiant les rayons cosmiques, photographia dans sa chambre de Wilson des trajectoires insolites: sous l'influence des champs magnétiques intenses, la moitié des électrons du rayonnement était déviée dans la direction prévue par les particules négativement chargées, tandis que l'autre moitié était déviée du même angle, mais dans une direction opposée: c'étaient là les positrons prédits. Ce furent des gerbes entières de ces particules que Blackett◆ et Occhialini◆ enregistrèrent bientôt sur leurs clichés.
Tel est, depuis Einstein et Planck, le développement de théories jugées de prime abord proprement insensées. Celles de Dirac

◆ Patrick Blackett : physicien anglais (né en 1897). Surtout connu pour ses travaux sur les rayons cosmiques, il a obtenu la première photographie d'un phénomène de transmutation et observé la matérialisation des photons ; il est également l'auteur d'une théorie générale du magnétisme.

◆ Giuseppe Occhialini : physicien italien (né en 1907), collaborateur de P. Blackett. A contribué à la découverte des mésons pi.

figurent en bonne place parmi les plus extravagantes; elles ont cependant été confirmées par l'expérience.
L'existence de l'électron positif ne faisait plus aucun doute, et son comportement répondait en tout point à celui que décrivait la théorie. Comme l'avait calculé Dirac en appliquant les formules de la relativité, il fallait une énergie minimale d'un million d'électrons-volts pour obtenir la matérialisation d'une paire négaton-positron, tandis que l'annihilation de cette paire restituait un rayonnement gamma d'au moins un million d'électrons-volts. D'autres physiciens — dont Irène et Frédéric Joliot, Jean Thibaud♦ — s'apprêtaient, de leur côté, à mettre en évidence la production d'électrons positifs sous l'effet de photons de grande énergie traversant la matière, chaque positon apparaissant en même temps qu'un négaton. Ils démontrèrent aussi le phénomène inverse: l'annihilation d'un électron positif et d'un électron négatif avec création de deux photons dont chacun possède l'énergie équivalant à la masse d'un électron.

♦ J. Thibaud : physicien français (1902-1960). Spécialiste en physique nucléaire, il a observé expérimentalement l'annihilation de la matière et la création de photons.

A toute particule correspond une antiparticule

On allait encore mettre en évidence d'autres antiparticules, dont l'antiproton, également prévu par la théorie. Pour susciter une paire proton-antiproton, il suffisait de mettre en œuvre une énergie suffisante. Avant l'invention des accélérateurs de particules, les plus grandes énergies connues étaient celles des rayons cosmiques. Avec les accélérateurs, il devenait possible de communiquer aux particules, en les lancant à de très grandes vitesses, des énergies supérieures à celle des rayons cosmiques eux-mêmes. Afin de pouvoir confirmer l'existence de l'antiproton, il fallait disposer d'une énergie de 6 milliards d'électrons-volts, ce qui fut réalisé en 1955 aux Etats-Unis, à Berkeley, au California Institute of Technology.
Observé dans le rayonnement cosmique, l'antineutron (qui diffère du neutron par ses propriétés magnétiques) a été produit artificiellement, par l'envoi d'antiprotons sur une cible contenant des protons.
Les théoriciens ont continué de triompher dans cette voie, puisque, après avoir annoncé qu'à toute particule — exception faite du photon et du méson pi zéro qui sont à eux-mêmes leur propre antiparticule — doit correspondre une antiparticule, les expérimentateurs ont réussi peu à peu à créer les antiparticules pressenties.

Les antiparticules existent-elles indépendamment des particules?

L'existence des antiparticules soulève un autre problème. On ne peut, en effet, ajouter à l'Univers une particule quelconque (proton, neutron, électron, neutrino...) sans y joindre du même coup l'antiparticule correspondante; on ne peut créer que des paires. Or, dans notre Univers, on ne rencontre très généralement que des protons, des neutrons, des négatons, des neutrinos..., et l'on peut se demander où se trouvent leurs nécessaires correspondants: antiprotons, antineutrons, positrons, antineutrinos. On peut concevoir qu'à l'origine les anti-éléments ont été projetés hors de notre monde en genèse.

Peut-être existe-t-il de l'antimatière ailleurs. S'il en est ainsi, il semble impossible de la détecter, car la lumière qu'émettraient les étoiles des mondes faits d'antimatière serait identique à celle qui provient des astres de l'Univers que nous connaissons, antiphotons et photons se confondant. On peut imaginer, encore, que des annihilations se produisent aux frontières des deux domaines, ce qui pourrait empêcher les masses de matière et d'antimatière de se rapprocher et, partant, de s'anéantir mutuellement...
L'existence des antiparticules une fois prouvée, il nous reste encore à savoir si leur masse gravitationnelle est positive ou négative. Dans l'état actuel de nos connaissances, toute vérification expérimentale est impossible à réaliser. Si cette masse était négative, on pourrait s'expliquer la séparation des mondes construits en matière ordinaire de ceux édifiés en antimatière.
D'après leur masse, on peut opérer un premier classement des particules:
— les leptons ou particules de masse faible: électrons, muons, neutrinos;
— les mésons, ayant une masse intermédiaire entre celle des leptons et celle des protons (bien que de masse nulle, le photon s'apparente aux mésons);
— les baryons, de masse égale ou supérieure à celle du proton: nucléons et hypérons.

En 1961, Murray Gell-Mann classe les particules en familles de huit membres

Comment peut-on s'y reconnaître dans ce foisonnement de particules («société au code minutieux et complexe»◆) circulant de toutes parts, tournoyant, tantôt évoquant l'idée d'onde et tantôt l'idée de corpuscule, dissimulant toujours l'une de leurs variables complémentaires (la connaissance de l'une entraînant automatiquement l'ignorance de l'autre), durant indéfiniment lorsqu'elles sont stables◆, ne naissant, lorsqu'elles sont instables, que pour disparaître sur le champ, devenant autres sous l'impact de collisions violentes, s'évanouissant en énergie pure ou surgissant à partir de cette énergie, tissant l'espace-temps et constituant toutes choses?
Quel est le dénominateur commun de toutes ces particules? Qu'y a-t-il, vraiment, d'élémentaire? Avant de trouver une réponse à cette question fondamentale, il s'agit d'apporter quelque ordre dans cet apparent désordre, c'est-à-dire essayer d'établir une systématique. Pour avoir commencé de mener à bien cette tâche, en jetant les bases d'une classification fondée sur certaines considérations de symétrie, le prix Nobel de physique fut attribué à Murray Gell-Mann en 1969. On peut dire que Murray Gell-Mann a joué un rôle comparable à celui de Mendéléïev en chimie, lorsque le savant russe conçut la table périodique des éléments◆. Murray Gell-Mann est, en effet, parvenu à établir que les principales particules connues se groupent

◆ O. Costa de Beauregard : *la Notion de temps* (Hermann, Paris, 1963).

◆ Pour celles qui se déplacent à la vitesse de la lumière, photons et neutrinos, il n'est pas possible de définir un temps propre à partir de temps mesurables, de sorte que la notion de leur durée n'a pas de sens.

◆ Voir tableau page 42.

en familles de huit membres, appartenant à un certain ordre de symétrie, les techniques de la théorie des groupes permettant alors d'obtenir des relations entre les propriétés des particules d'une même famille et, par suite, de prédire l'existence de particules nouvelles. Il en a été ainsi pour l'un des derniers venus dans le groupe des hypérons (il s'agit donc d'une particule étrange), le grand oméga moins, aux caractéristiques tout à fait insolites, mis en évidence aux Etats-Unis, au début de 1964, par les expérimentateurs de Brookhaven qui utilisèrent le synchrotron dont les énergies s'élèvent jusqu'à 33 milliards d'électrons-volts. Sa trajectoire fut photographiée au moyen d'une chambre à bulles géante; par sa durée de vie (un dix-milliardième de seconde), le grand oméga moins entre dans la catégorie des particules «quasi stables» et n'est pas considéré comme un «état résonant» d'autres particules. Or — et c'est pourquoi cette découverte a été retentissante — le grand oméga moins prenait parmi les hypérons la place qui lui avait été assignée d'avance par les seules considérations théoriques. Cette prévision est à rapprocher de celles que fit Mendéléïev et qui se justifièrent lorsque les cases vides de sa table furent remplies les unes après les autres, occupées par des éléments ultérieurement découverts.

Les particules élémentaires sont-elles constituées de quarks?

Jugeant possible l'existence de particules d'un type plus simple, groupées en familles de trois membres seulement, Murray Gell-Mann et Yuval Ne'eman parvinrent à la notion de quarks, lesquels seraient les composants ultimes de toutes les particules connues, les entités sous-nucléaires, la réalité sous-jacente vraiment élémentaire.
Les quarks existent-ils réellement ou ne sont-ils qu'une hypothèse mathématique commode permettant de calculer les conséquences de la symétrie? Nous ne le savons pas encore, car, s'ils existent, les quarks seront extrêmement difficiles à déceler. Notons que ce mystérieux terme de «quark» a été emprunté à James Joyce. Ce mot de pure fantaisie, qui figure dans «Finnegan's Wake», ne veut exactement rien dire. Avouons qu'il convient fort bien, en l'occurrence, à l'enseigne de cette microphysique que le langage courant ne permet pas d'exprimer...
Il est une autre particule, également tout hypothétique, le graviton, qui serait liée à une onde gravitationnelle, car on a de fortes raisons de penser que la force de la gravitation dépend elle aussi d'un système onde-corpuscule.
On doit à Georges Darmois et à André Lichnerowicz la révélation théorique des ondes gravitationnelles, ondes dont Einstein soupçonnait l'existence. De même que les équations de Maxwell contiennent en puissance les ondes électromagnétiques, les équations de la relativité générale impliquent l'existence des ondes gravitationnelles. Ces ondes ont, dans le vide, une propagation identique à celle des ondes électromagnétiques, donc la même vitesse, mais elles ne sont

pas de même nature: elles diffèrent par le spin de la particule qui leur est liée, le graviton.
Il est très difficile de les détecter, étant donné l'extrême faiblesse des champs de gravitation: dans les interactions nucléaires, la force de gravitation est 10^{39} fois plus faible que la force électrique! En recourant à des appareillages très complexes, J. Weber◆, aux Etats-Unis, paraît être parvenu en 1967 à les mettre en évidence◆. Ses expériences porteraient sur les interactions électromagnétiques associées à des accélérations locales de plusieurs centaines de milliers de *g* (*g:* accélération de la pesanteur terrestre), autrement dit, il s'agissait de remuer de très grosses masses avec des accélérations très grandes pour engendrer des ondes gravitationnelles.
Etant donné la merveilleuse richesse des théories d'Einstein, on peut s'attendre à bien des découvertes dans cette voie.
Au problème des ondes gravitationnelles est étroitement rattaché celui de la «radiation gravitationnelle». Que faut-il entendre par là? La radiation d'un champ physique, c'est le comportement de ce champ loin de ses sources. On sait, par exemple, que, loin de ses sources, le champ électromagnétique a un comportement particulier; champ électrique et champ magnétique sont, dans des unités convenables, égaux et orthogonaux. C'est la «radiation électromagnétique». Le champ gravitationnel (qui est décrit par le tenseur◆ de courbure de l'espace-temps) a un comportement mathématique semblable à celui d'un double champ électromagnétique. Loin des masses qui l'engendrent, on a pu déterminer la radiation gravitationnelle, c'est-à-dire la forme du champ qui subsiste dans la propagation, les autres formes s'amortissant très vite. Concernant la théorie de ces radiations, tous les problèmes n'ont pas encore été résolus et, notamment, le problème de la quantification, qui permet la description des phénomènes à l'échelle microscopique.
De même que la radiation électromagnétique peut être interprétée comme le champ du photon (particule de spin 1 et de masse nulle), la radiation gravitationnelle peut être interprétée comme le champ d'une sorte de double photon, le graviton◆ (particule de spin 2 et de masse pareillement nulle). Ce graviton, Mme Tonnelat◆ et Gérard Petiau◆ ont cherché à l'introduire dans une théorie générale des particules à spin.

◆ Joseph Weber : physicien américain, de l'université du Maryland.

◆ Les dispositifs utilisés devaient avoir une sensibilité passant de loin celle de la célèbre balance de torsion d'Eötvös (Lorand Eötvös, physicien hongrois [1848-1919], construisit le premier pendule de torsion utilisable en prospection géophysique).

◆ Tenseur : entité géométrique que généralise la notion de vecteur.

◆ Il faudrait 4 neutrinos pour engendrer un graviton (le neutrino est une particule de masse nulle et de spin 1/2).

◆ Mme M.-A. Tonnelat : physicienne française, professeur à la Faculté des sciences de Paris, spécialiste de la mécanique quantique relativiste.

◆ Gérard Petiau : physicien français (né en 1911), spécialiste également de la mécanique quantique relativiste.

Relativité générale ou « théorie relativiste de la gravitation »

«L'un des grands intérêts que présente la relativité générale — qu'il vaudrait mieux d'ailleurs appeler «théorie relativiste de la gravitation» — c'est qu'elle est le meilleur exemple d'une théorie «non linéaire» qui «marche bien»: elle est *non linéaire* en ceci que les ondes qu'elle décrit ne s'ajoutent pas purement et simplement les unes aux autres, comme elles le font ordinairement, mais sont déformées les unes par les autres. Les physiciens, qui se préoccupent, en particulier, de mécanique quantique, s'intéressent beaucoup, à

présent, au caractère non linéaire. Ils pensent que les difficultés qu'ils rencontrent, notamment en ce qui concerne la détermination a priori de la masse des particules élémentaires, sont liées au caractère linéaire des équations utilisées en mécanique quantique, équations seulement approchées de celles, idéales, non linéaires, qu'il s'agira d'établir. Le problème de la quantification du champ de gravitation peut apparaître lui-même, à cette lumière, comme un problème clé. Or les difficultés sont en passe d'être surmontées grâce à différentes méthodes qui visent à décrire le graviton et à former des équations auxquelles il doit obéir.◆»

◆ A. Lichnerowicz : déclaration rapportée in *la Relativité*, par F. Lot (Diagrammes, Ed. du Cap, Monaco, 1964).

La relativité générale a conduit les cosmologistes à envisager pour l'Univers des modèles théoriques qui ne sont pas en équilibre: c'est notamment la théorie de l'Univers en expansion, confirmée par la fuite d'ensemble des galaxies dans toutes les directions de l'espace jusqu'à la limite de nos observations. L'existence des champs offre un autre mystère. La notion de champ électromagnétique est apparue, au siècle dernier, dans la théorie de Maxwell. Les perturbations de ce champ se manifestent par toute la série des radiations, qui vont des ondes hertziennes aux rayons X et gamma. La théorie de la relativité générale a fait rentrer l'attraction gravifique dans le cadre de la conception générale des champs. De son côté, la mécanique ondulatoire a associé aux particules de matière un nouveau champ étendu et continu, tandis qu'aux champs de la théorie classique des rayonnements il fallut adjoindre des particules symbolisant la discontinuité des échanges d'énergie entre matière et radiations. Einstein s'est évertué en vain à édifier une théorie du champ unitaire qui interpréterait l'existence à la fois des forces gravifiques et des forces électromagnétiques. Or un nouveau type de champ, le champ nucléaire, s'est imposé à son tour, dont l'importance est aussi grande que celle des deux autres. Les forces de ce champ s'exercent à de très courtes distances, de l'ordre des dimensions nucléaires◆; elles interviennent, liées à des mésons, dans la cohésion interne des noyaux d'atomes. La complexité du problème ne permet pas d'entrevoir prochainement une géométrisation complète de la physique.

◆ Qui sont de l'ordre du fermi (voir page 259).

DÉBATS ET PERSPECTIVES

Au cours de cet exposé sur l'évolution des idées en physique depuis le début du siècle, nous n'avons fait allusion qu'aux réactions des «classiques» à l'égard des «modernes». En physique avancée, l'accord en profondeur est loin d'être établi. C'est ainsi qu'un ardent débat, toujours ouvert, s'est institué en microphysique au sujet de l'opposition entre statistique et déterminisme: la description de la nature doit-elle être ou non déterministe? Einstein a pris ici nettement position. On a souvent cité son mot: «Je ne croirai jamais que Dieu joue aux dés avec le Monde», par lequel il exprimait son rejet de

la conception statistique de la physique. La mystique probabiliste, le renoncement des théoriciens à la notion de réalité dans le domaine physique le blessaient au vif. Une base statistique lui était proprement insupportable et son plus grand espoir était de parvenir à la détruire enfin définitivement par l'extension de la théorie de la relativité générale que serait la théorie du champ unitaire. Mallarmé soutenait que l'Univers était fait pour aboutir à un Livre. Einstein, lui, ambitionnait de l'exprimer en une Formule... Toute l'expérience scientifique le confirmait dans le sentiment que l'idée de la simplicité mathématique est réalisée dans la nature. La pure construction mathématique doit nous permettre de découvrir les concepts, avec les lois qui s'y rattachent, qui donnent la clé des phénomènes. Si l'expérience peut nous guider dans notre choix des concepts mathématiques utiles, elle ne peut pratiquement être la source dont ils découlent. «En un certain sens, donc, dit-il, je tiens pour vrai que la pensée pure soit capable de saisir le réel, comme les Anciens le rêvaient.» C'est là une de ses constantes philosophiques. A ses yeux, l'Univers, obéissant à des lois simples, est radicalement ordonné. On pourrait, a priori, le supposer chaotique◆. Insaisissable pour l'esprit, le seul ordre qu'on verrait ne serait autre que celui-là qu'y introduit l'intelligence humaine, un ordre semblable au classement alphabétique des mots dans le dictionnaire. Mais l'espèce d'ordre instituée par la théorie de Newton, par exemple, est d'un tout autre caractère. En effet, même si les axiomes de la théorie étaient posés par l'homme, le succès d'une telle entreprise supposait en l'occurrence un «ordre d'un haut degré du monde objectif».

◆ « Figure-toi qu'ils ont retrouvé dans l'intime des corps, et comme en deçà de leur réalité, le vieux CHAOS... »
P. Valéry : *Mon Faust* (Gallimard, Paris, 1946)

Ordre stupéfiant, au sujet duquel Einstein parle de «miracle» et de «mystère»: «La chose la plus incompréhensible du monde, c'est que le monde est compréhensible.» L'ordre du monde, et sa compréhensibilité, «c'est cela le miracle, qui se fortifie de plus en plus avec le développement de nos connaissances. C'est ici que se trouve le point faible des positivistes et des athées professionnels, qui se sentent heureux parce qu'ils ont la conscience non seulement d'avoir, avec un plein succès, privé le monde des dieux, mais aussi de l'avoir dépouillé des miracles. Le curieux, c'est que nous devons nous contenter de reconnaître le miracle sans qu'il y ait une voie légitime pour aller au-delà.»

Les citations précédentes sont extraites de lettres qu'Einstein écrivait à son vieux compagnon de jeunesse à Berne, Maurice Solovine, à qui il écrivait encore◆: «Je n'ai pas trouvé de meilleure expression que l'expression «religieuse» pour la confiance en la nature rationnelle de la réalité qui est, au moins dans une certaine mesure, accessible à la raison humaine. Là où ce sentiment fait défaut, la science dégénère en un empirisme dépourvu d'esprit.» Les vues d'Einstein sur la religion sont ainsi intimement liées à sa conception de la science physique et de la science tout entière.

◆ A. Einstein : *Lettres à Maurice Solovine* (Gauthier-Villars, Paris, 1951).

Parmi les physiciens, deux grandes tendances, en somme, se manifestent, qui, d'ailleurs, bien qu'opposées, se rejoignent sur certains points: les réalistes croient — car c'est là un article de foi, donc indémontrable — en une réalité physique, existant indépendamment de toute observation, qui existerait même en l'absence de tout observateur, et qui, par le moyen de la physique, peut être décrite telle qu'elle est vraiment; les positivistes refusent cette proposition comme relevant de la métaphysique — elle est donc dénuée de sens puisque invérifiable —, leur seule tâche étant de relier correctement les observations entre elles au moyen de symboles appropriés pour aboutir à un formalisme qui permette de prédire d'autres phénomènes.
Au nom de l'intelligibilité, quelques théoriciens critiquent les conceptions actuelles, devenues «orthodoxes», de la microphysique, considérant avec Louis de Broglie que «la représentation concrète de la réalité physique dans le cadre de l'espace et du temps avec connexion causale a été à l'origine de tous les progrès de la science moderne», qu'elle est «conforme aux tendances profondes de notre esprit» et que nous «cessons de comprendre si nous nous en écartons»◆. Aussi envisagent-ils la possibilité d'un retour aux représentations concrètes, en développant une théorie des particules qui les représente dans le cadre de l'espace-temps comme des objets étendus ayant une structure interne bien définie. Louis de Broglie écrit encore à ce sujet: «Depuis trente-cinq ans, la microphysique s'est heurtée à de grandes difficultés, qui ont pu paraître insurmontables, pour maintenir ce genre d'images et, n'y parvenant pas, elle y a renoncé. La question est de savoir si ce renoncement est vraiment nécessaire et si l'on ne pourrait pas, à l'aide de conceptions nouvelles et d'analyses plus approfondies, revenir à une représentation concrète des réalités microphysiques se rapprochant de celles du type classique. Nous pensons personnellement que cela est réalisable et que de grands efforts doivent être faits pour achever d'y parvenir. Il pourrait, en effet, être dangereux pour l'avenir de la physique qu'elle se contente trop facilement de pur formalisme, d'images floues et d'explications toutes verbales s'exprimant par des mots à signification imprécise.»

◆ L. de Broglie : *Certitudes et incertitudes de la science* (Albin-Michel, Paris, 1966).

A ce propos, il convient de remarquer ceci: la physique a fait intervenir des notions abstraites dès qu'elle s'est constituée en tant que science, pour ne reposer finalement que sur elles. Une notion abstraite peut sembler l'être «plus ou moins»: ainsi les notions de rapport, d'hyperbole, par exemple, semblent-elles plus abstraites que, respectivement, les notions de longueur et de parabole. Et c'est en ce sens que l'on déclare «très abstraite» la physique moderne, par rapport à la physique classique dont les concepts sont devenus si familiers qu'on en oublie leur caractère abstrait.
Il apparaît, en tout cas, observe Bernard d'Espagnat, que la raison peut, ainsi que l'a établi la théorie de l'atome, «transcender le

langage usuel, faire fi des images, des descriptions et des modèles et, là où tous ces procédés trouvent leurs limites, baser sur le pur symbolisme mathématique une représentation des phénomènes qui permette de les prédire. Que faire de cette donnée, nouvelle et quelque peu déconcertante? Nous l'ignorons encore: mais elle existe et montre que la raison est un outil plus riche encore en possibilités et perspectives que ses admirateurs des temps passés ne l'avaient cru. De cela aussi toute philosophie honnête aura sans doute, dans l'avenir, à tenir compte.◆»

La physique conduira-t-elle demain à une nouvelle explosion d'idées aussi révolutionnaires que celles qui l'ont ébranlée à l'aube de ce siècle? Il se peut que certains ordres de phénomènes, qui nous échappent complètement, nous étonnent encore plus que tous ceux que l'on a pu jusqu'ici déceler: leur interprétation exigera des théories toujours plus abstruses, qui provoqueront d'autres mutations dans la pensée scientifique et philosophique. Si l'on a pu croire, hier, la science quasiment achevée, les chercheurs d'aujourd'hui ne risquent plus de se bercer de la même illusion. Les découvertes accumulées au cours de ces dernières années leur ont montré que «l'imagination se lasse plus vite de concevoir que la nature de fournir».

Fernand Lot.

◆ B. d'Espagnat : *Conceptions de la physique contemporaine* (Hermann, Paris, 1965).

HOLOGRAMME-HOLOGRAPHIE (Hologram-holograph)

pages 404 à 406, 450.

Méthode permettant de restituer le relief d'un objet, à partir d'informations recueillies sur une plaque photographique ♦.

♦ Hologramme = enregistrement total.

Le principe, établi par D. Gabor (1947), est le suivant. Dans un premier temps (enregistrement), on enregistre sur la surface sensible les interférences lumineuses de deux groupes d'ondes : une onde directe provenant d'une source cohérente ♦ éclairant l'objet, et les ondes diffusées ou transmises par l'objet. On obtient ainsi l'hologramme,

♦ Voir Laser.

Le deuxième temps (reconstruction) consiste à envoyer sur la plaque un faisceau de lumière. Dans ces conditions, la plaque restitue les ondes qui l'ont impressionnée, et l'on peut observer l'objet « holographié », c'est-à-dire en relief.

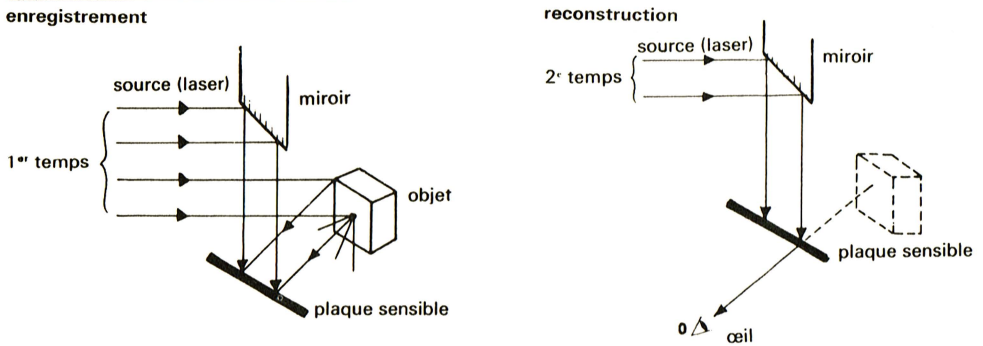
La difficulté du procédé est qu'il nécessite une source de lumière cohérente. C'est le faisceau laser qui a fourni la solution (découverte par Leith et Upatniks, 1961).

1er temps : enregistrement

L'objet diffuse de la lumière. Les rayons diffusés interfèrent avec les rayons réfléchis par le miroir.

2e temps : reconstruction

L'œil placé en O perçoit une image virtuelle en relief de l'objet.



Outre l'obtention du relief, les hologrammes ont d'autres intérêts. Un hologramme ne ressemble que peu ou pas à l'objet, d'où le codage possible de renseignements qu'on ne pourra restituer que si on connaît le montage de reconstruction : on assure ainsi une transmission secrète du renseignement. De plus, un fragment de plaque peut restituer l'objet entier, ce qui n'est pas sans intérêt.

HUYGENS (Christian) pages 174, 331, 366, 385, 417, 481.

Mathématicien, astronome et physicien hollandais, né à La Haye en 1629, mort en 1665.

L'un des plus éminents savants du XVIIe siècle, Huygens est resté célèbre pour ses travaux en mathématiques, en astronomie, en mécanique et en optique.

Ses premières études le dirigent vers les mathématiques et il y laisse une œuvre assez importante. Perfectionnant dans sa jeunesse le télescope, il garde toute sa vie un goût prononcé pour l'astronomie : découverte des anneaux et d'un satellite de Saturne, de la nébuleuse d'Orion...

C'est toutefois dans le domaine de la physique que Huygens effectue ses décou-

vertes les plus remarquables. En mécanique, il met au point en 1656 l'horloge à pendule. Puis, poursuivant ses travaux sur le pendule, il fait des recherches sur l'accélération de la pesanteur, formule des théorèmes sur la force centripète dans les mouvements circulaires, déduit la forme ellipsoïdale de la Terre et énonce la définition du moment d'inertie ♦. Nommé membre de la Royal Society en 1663, il expose alors les lois régissant la collision des corps élastiques.

♦ Voir Moment.

En optique pratique, il passe six années à construire des lentilles ♦ à énorme distance focale, formant des « télescopes aériens ». En optique physique, il découvre la polarisation de la lumière et, surtout, développe la théorie ondulatoire de celle-ci, ce qui lui permet de démontrer les lois fondamentales de la réflexion ♦ et de la réfraction. La théorie ondulatoire de la lumière, contredite par la théorie corpusculaire de Newton, ne sera universellement acceptée qu'au XXe siècle.

♦ Voir ce mot.

♦ Voir l'article : l'Optique, page 366.

Ouvrages essentiels :
La Pluralité des mondes (Moreau, Paris, 1702) ;
Traité de la lumière (Paris, 1920) ;
Œuvres complètes (M. Nijhoff, La Haye, 1888 et 1950).

HUYGENS (Principe de) (Huygens' principle) pages 174, 366 et 367.

Huygens est le père de la théorie ondulatoire de la lumière : c'est à lui qu'on doit l'hypothèse suivant laquelle la lumière est une vibration se propageant à grande vitesse, hypothèse confirmée par la réalisation d'interférences lumineuses et par la mesure de la vitesse (ou célérité) de la lumière dans différents milieux. Le principe de Huygens exprime que chaque point atteint par une vibration lumineuse devient à son tour une source de vibration (source secondaire).

HYDRODYNAMIQUE (Hydrodynamics) page 264.

Partie de la mécanique des fluides consacrée au mouvement des fluides non — ou peu — compressibles, c'est-à-dire des liquides. Mais les méthodes de l'hydrodynamique permettent d'étudier également la propagation d'ondes sonores, d'ondes de choc, l'écoulement des gaz dans un turboréacteur, etc. C'est dire que la frontière entre hydro- et aérodynamique est difficile à définir.

HYDROGÈNE (Hydrogen) pages 33, 77, 84, 109, 110, 125, 177, 181, 253, 276, 289, 313, 321, 326, 327, 329, 351, 417, 419, 420, 421, 424, 428, 438, 441, 447, 453, 478, 484, 505, 507, 529.

Élément correspondant au numéro atomique $Z = 1$. C'est donc le premier élément de la classification périodique ♦.

♦ Voir le tableau pages 42 et 43.

L'hydrogène naturel est formé d'un mélange de 3 isotopes :

— l'hydrogène $^{1}_{1}H$, dont le noyau est formé d'un seul proton, donc de nombre de masse 1 ;

— l'hydrogène lourd $^{2}_{1}H$, ou deutérium (quelquefois symbolisé D), dont le noyau comporte un proton et un neutron et dont le nombre de masse est par conséquent 2 ;

— le tritium $^{3}_{1}H$ (ou T), comportant un proton et deux neutrons, de nombre de masse 3.

Les proportions de ces isotopes sont :

$^{1}_{1}H$: 99,985 % ; $^{2}_{1}H$: 0,015 % ; $^{3}_{1}H$: 1/10 000 000 %.

Le gaz hydrogène, formé de molécules H_2 (constituées de 2 atomes d'hydrogène) est un gaz léger (14,5 fois moins dense que l'air) et, de ce fait, utilisé pour le gonflage des ballons utilisés en météorologie. Il est incolore et inodore.
C'est un gaz très inflammable. Sa combustion donne de l'eau (d'où son nom). Il entre dans la composition des substances organiques et forme ainsi avec le carbone des millions de molécules différentes ♦.

♦ Voir Chimie organique.

HYPERCHARGE (Hypercharge)

Nombre introduit pour tenter de classer les particules élémentaires. L'hypercharge Y, qui n'est pas du tout une charge mais un nombre, est liée à l'étrangeté S et au nombre baryonique B d'une particule par la relation : $Y = B + S$.
Ainsi, le proton ($S = O$; $B = 1$) a une hypercharge $Y = 1$.
Pour le Λ, hypéron d'étrangeté $S = 1$, $B = 1$, on a $Y = 0$.

HYPÉRONS (Hyperons)

pages 81, 256, 275, 294, 353, 421, 430, 433, 435, 436, 440, 442, 537.

Particules élémentaires de masse supérieure à celle des nucléons. Ils forment avec ceux-ci l'ensemble des baryons. Comme tous les baryons, ce sont des particules satisfaisant à la statistique de Fermi-Dirac (donc des « fermions ») et qui ont une étrangeté différente de zéro.
Les hypérons sont des particules peu stables : leur vie moyenne est de l'ordre de 10^{-10} seconde. Ils se désintègrent en donnant soit un autre hypéron, soit un proton ou un neutron, et un méson.
La nomenclature des hypérons fait appel aux lettres grecques majuscules. On trouvera ainsi :

— le lambda neutre et l'antilambda : Λ^o et $\overline{\Lambda^o}$

— les sigma et antisigma neutres : Σ^o et $\overline{\Sigma^o}$
— les sigma et antisigma positifs : Σ^+ et $\overline{\Sigma^+}$
— les sigma et antisigma négatifs : Σ^- et $\overline{\Sigma^-}$
} d'étrangeté ± 1

(un antisigma positif étant négatif, et inversement)

— les xi { neutres : Ξ^o et $\overline{\Xi^o}$; négatifs : Ξ^- et $\overline{\Xi^-}$ } d'étrangeté ± 2

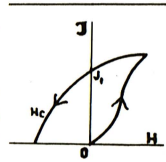
(les antihypérons ayant l'étrangeté positive).

HYSTÉRÉSIS (Hysteresis)

Intensité d'aimantation

Lorsqu'on aimante un barreau de fer, on constate que l'intensité d'aimantation ♦ $\vec{J}$ varie en même temps que l'excitation $\vec{H}$, jusqu'à la saturation, valeur limite de $\vec{J}$ lorsque $\vec{H}$ croit indéfiniment. Cette opération peut se représenter par une courbe $J = f(H)$, dite « courbe de première aimantation » (fig. ci-contre).

♦ Voir l'article : Électricité et magnétisme.



courbe de première aimantation

Si on fait décroître $\vec{H}$, les valeurs de $\vec{J}$ restent constamment au-dessus de celles correspondant, à l'aller, à la même valeur de H. En particulier, lorsque $H = 0$ il reste une aimantation J_R, dite « aimantation rémanente ». De même, pour désaimanter le barreau, il faut exercer en sens opposé au sens primitif une excitation H_C, dite excitation coercitive.

Il y a en quelque sorte retard (en grec : *hysteron*) de l'effet sur la cause, d'où le nom d'hystérésis donné à ce phénomène.

Cycle d'hystérésis

Lorsqu'on fait varier H entre deux valeurs opposées $+ H_M$ et $- H_M$, $\mathfrak{J}$ varie entre deux valeurs $+ \mathfrak{J}_M$ et $- \mathfrak{J}_M$. Les variations de $\mathfrak{J}$ en fonction de H sont représentées par une courbe fermée, appelée cycle d'hystérésis (fig. ci-contre).

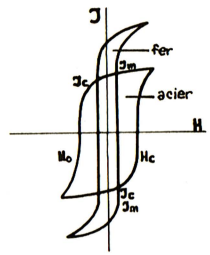
Chaque substance est caractérisée par son cycle d'hystérésis, qui peut être « trapu » (acier) ou filiforme (fer doux).

Un cycle filiforme correspond à une substance s'aimantant fortement ($\mathfrak{J}_R$ grand), mais perdant facilement son aimantation, H_C étant petit.

Un cycle trapu correspond aux aimants permanents (H_C grand). Dans ce cas, les champs extérieurs créent une excitation en général inférieure à H_C.

L'hystérésis entraîne une perte d'énergie par échauffement de la substance. On cherche à l'éviter dans les carcasses de moteurs ou de transformateurs, en les réalisant avec des matériaux dont le cycle est particulièrement plat.

On démontre, en effet, que les pertes sont proportionnelles à la surface enfermée dans le cycle.



courbe fermée
(cycle d'hystérisis)

IJK

IMPÉDANCE (Impedance)

Notion qui remplace, pour les circuits parcourus par un courant alternatif, celle de résistance pour un circuit parcouru par un courant continu. Comme la résistance, l'impédance, quotient de la tension aux bornes du circuit par l'intensité qui la traverse, s'exprime en ohms. A la différence de la résistance, l'impédance dépend de la fréquence du courant. Un solénoïde ♦ a une impédance qui augmente avec la fréquence. Au contraire, un condensateur voit son impédance diminuer lorsque la fréquence augmente.

♦ Solénoïde : fil enroulé régulièrement sur un cylindre, formant donc une hélice circulaire.

INCERTITUDE (Principe d') : voir Heisenberg et les pages 110, 276, 291.

INDICE DE RÉFRACTION : voir Réfraction et les pages 98, 330, 484, 493.

INDUCTION (Induction) pages 26, 191, 193, 199, 201, 257, 264, 267, 270, 275, 322, 325, 357, 510, 535.

Induction magnétique

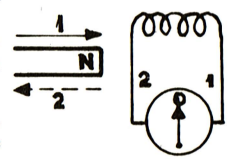
Grandeur caractérisant, en un point donné d'un milieu, l'effet d'un champ magnétique. Le vecteur ♦ induction magnétique $\vec{B}$ a la direction indiquée par l'aiguille aimantée, son sens étant celui qui mène du pôle sud au pôle nord de cette aiguille. L'intensité du vecteur induction est le produit de celle du vecteur champ (ou excitation) magnétique $\vec{H}$, par une constante μ caractérisant le milieu : la perméabilité magnétique, qu'on peut aussi écrire : $\mu = \mu_0 \mu_r$, en faisant apparaître :

μ_0 : perméabilité magnétique du vide $= 4\pi\ 10^{-7}$ (dans le système international),

μ_r : perméabilité relative du milieu, peu différente de 1 pour les milieux ne présentant pas le phénomène de ferromagnétisme, et pouvant prendre des valeurs élevées dans le cas contraire.

♦ Voir Aperçu mathématique, page 17.

♦ Galvanomètre : appareil de mesure permettant de déceler des courants de faible intensité. Lorsque l'aimant se déplace dans le sens 1, l'aiguille du galvanomètre dévie vers 1, et inversement pour le sens 2.

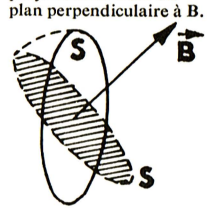


Induction électromagnétique

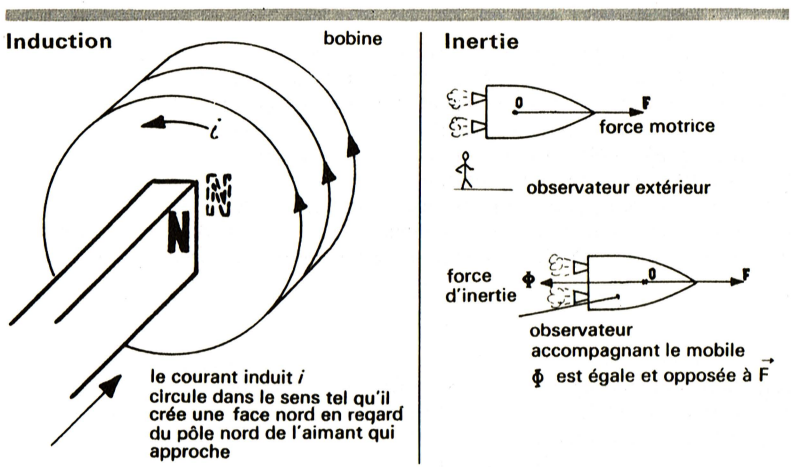
Lorsqu'on approche un barreau aimanté d'un circuit constitué d'une bobine reliée aux bornes d'un galvanomètre ♦, on observe, pendant le mouvement de l'aimant, l'apparition d'un courant dans le circuit. Ce courant induit est dû aux variations du flux magnétique qu'envoie l'aimant, appelé inducteur, dans le circuit induit. Ce phénomène est appelé induction électromagnétique. Il est très général et se produit chaque fois que le flux ♦ du champ magnétique auquel est soumis le circuit subit des variations, quelle que soit la cause de celles-ci : déplacement d'un aimant, déplacement d'un électro-aimant, variation du courant dans l'électro-aimant, etc.

Cette production de courants induits est à la base des machines telles que les

♦ Flux : le flux du vecteur induction $\vec{B}$ à travers une surface S est le produit de l'intensité de B par la projection de S sur un plan perpendiculaire à B.



dynamos et les alternateurs. L'induction électromagnétique permet le transfert d'énergie d'un circuit à un autre. C'est le principe des transformateurs.
Un courant crée un champ magnétique baignant le circuit dans lequel il circule, et qui variera en même temps que le courant. Il en résulte, dans ce cas, un courant induit qui se superpose au courant principal. Ce cas particulier de l'induction s'appelle auto- ou self-induction.
Le courant induit — et la force électromotrice qui le crée, dite f.é.m. induite — ne se produit que pendant la variation du flux, et son sens est lié à celui de la variation par la loi de Lenz, qui est une loi de modération, dont on trouve plusieurs exemples en physique : le sens du courant est tel qu'il s'oppose, par ses effets, à la cause qui lui donne naissance. Concrètement : si l'on approche un pôle nord d'aimant, le courant induit crée un champ magnétique qui tend à repousser l'aimant. La face de la bobine en regard de l'aimant est donc une face nord, puisque 2 pôles de même nom se repoussent (figure ci-dessous).



INERTIE (Inertia) pages 130, 172, 180, 198, 270, 272, 283, 285, 494, 518.

L'inertie représente l'effort qu'il faut faire pour communiquer à un corps une accélération : la même force n'a pas le même effet sur un grain de sable ou sur un bloc de rocher. Cet exemple montre que la grandeur physique mesurant l'inertie est la masse.

Principe d'inertie; force d'inertie

Selon le principe d'inertie, conséquence du principe fondamental de la dynamique classique ♦, un corps qui n'est soumis à aucune force ne peut être qu'au repos ou en mouvement rectiligne uniforme.

♦ Ce principe se traduit par la relation fondamentale : $\vec{F} = m\vec{\gamma}$ où F est la force, m la masse et γ l'accélération.

Imaginons donc un observateur accompagnant un corps dans son mouvement, un cosmonaute dans un véhicule spatial, par exemple. Pour lui, son véhicule est en équilibre, c'est-à-dire au repos par rapport à lui (bien qu'il en perçoive les accélérations). D'après le principe d'inertie, il n'est soumis à aucune force. Il faut donc admettre l'existence d'une force opposée à la force motrice et égale à celle-ci : c'est la force d'inertie.
Cette force d'inertie n'est pas une vue de l'esprit : c'est elle qui projette les

occupants d'une voiture lors d'un freinage énergique et qui, sous le nom de force centrifuge, précipite ces mêmes occupants vers l'extérieur d'un virage.

INFORMATIQUE (Computer science)

L'informatique est une science nouvelle qui englobe le rassemblement, le classement, la conservation et l'utilisation (transmission et interprétation) des informations. Concrètement, c'est la science des calculateurs électroniques ou, mieux, des ordinateurs.
L'informatique pourrait être divisée, selon la terminologie anglo-saxonne, en deux branches : la réalisation des calculatrices, affaire de techniques, évoluées mais purement matérielles (« hardware » en anglais) et les programmes fournis, qui sont affaire de matière grise (le « software » anglo-saxon) ♦.

♦ Voir l'article : l'Électronique, page 246.

INFRAROUGE (Infrared radiation) pages 208, 235, 264, 331, 383.

Radiations électromagnétiques de longueur d'onde supérieure à 0,8 micron, c'est-à-dire se situant en deçà du rouge dans le spectre lumineux, d'où leur nom. Invisibles, les infrarouges sont détectés sur des récepteurs thermiques (couple thermoélectrique), car l'énergie qu'ils transportent apparaît essentiellement sous forme de chaleur : le chauffage par infrarouge est bien connu... Il existe également des émulsions photographiques sensibles à ces radiations.
Tout corps chauffé émet un rayonnement plus ou moins riche en infrarouges (c'est la source la plus courante de ces rayons). Les « lampes à infrarouges » sont des lampes à incandescence dont le verre absorbe la partie visible du rayonnement émis.

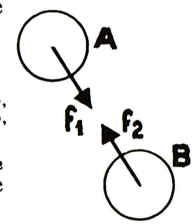
INFRASONS

Vibration sonore de fréquence inférieure au seuil de perception de l'oreille, se situant à une fréquence de 16 hertz environ. De tels infrasons peuvent être produits par des générateurs comparables à des tuyaux d'orgue.
Les infrasons semblent ne pas être aussi inoffensifs qu'on pourrait le croire : les recherches effectuées au C.N.R.S. de Marseille sur la production d'infrasons de fréquence 7 Hz et 3,5 Hz ont montré qu'ils pouvaient, à faible puissance, créer des malaises variés chez les personnes qui y sont soumises et qu'à forte puissance leur effet pourrait être destructeur, du fait du phénomène de résonance prenant naissance dans la structure des bâtiments et provoquant leur rupture.

INTENSITÉ (Intensity) pages 186, 187, 192, 250, 260, 266, 306, 308, 316, 358, 448, 450, 451, 496, 505, 506, 507, 513, 519, 523, 528.

L'intensité d'un courant électrique est la quantité d'électricité (ou charge) qui traverse une section quelconque du circuit pendant l'unité de temps. Elle s'exprime en ampères (A).

INTERACTION (Interaction) pages 37, 88, 105, 173, 204, 205, 234, 256, 261, 266, 270, 274, 275, 313, 326, 334, 337, 340, 348, 349, 351, 354, 355, 361, 413, 421 à 426, 427, 432, 434, 438, 439, 440, 486, 490, 510, 518, 525.



Lorsqu'un corps A exerce une force f_1 sur un corps B, B exerce sur A une force f_2 opposée (égale et de sens contraire). Ce résultat, connu sous le nom de principe

de l'action et de la réaction, exprime que les deux corps A et B sont en interaction, par l'intermédiaire d'un champ de nature quelconque.
Les phénomènes physiques sont les résultats de trois grands types d'interactions :
— interactions de gravitation,
— interactions électromagnétiques,
— interactions nucléaires (interactions fortes, interactions faibles),
qui semblent jusqu'à présent indépendantes les unes des autres ♦. Ces interactions sont d'intensités très inégales. Si l'on considère l'importance des interactions des différents types existant entre deux particules, on les classe dans l'ordre suivant, si l'on prend pour référence l'interaction forte :
— interaction forte : 1 ;
— interaction électromagnétique : 10^{-3} ;
— interaction faible : 10^{-14} ;
— interaction de gravitation : 10^{-40}.

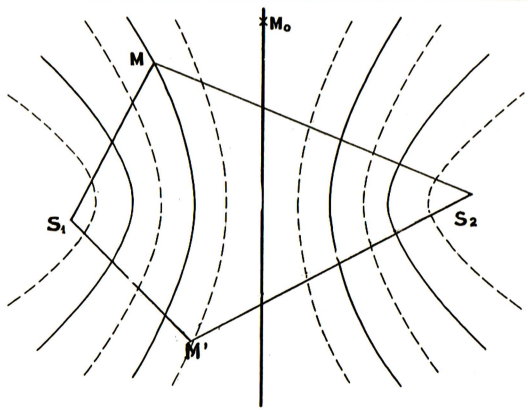
♦ Voir Théorie unitaire.

INTERFÉRENCE ♦ (Interference) pages 86, 264, 268, 283, 304, 305, 331, 340, 357, 360, 371 à 380, 385, 393, 401, 408, 416, 417, 537.

♦ Se reporter à l'article : l'Optique, pages 371 à 380.

Phénomène résultant de l'action simultanée, en un même point M, de deux vibrations de même fréquence, donc de même longueur d'onde, provenant de deux sources différentes S_1 et S_2 (sources synchrones).
Les vibrations provenant de S_1 et S_2 et arrivant en M ont parcouru des chemins en général différents. Si ces chemins diffèrent d'un nombre entier de longueurs d'onde, elles sont en phase et leurs effets s'ajoutent. Le point vibre avec une amplitude supérieure à celle des sources.
Si les chemins diffèrent d'un nombre de longueurs d'onde égal à un nombre entier plus $\frac{1}{2}$, les vibrations sont en opposition de phase et annulent leurs effets.
Le point restera constamment immobile.
On définit des lignes dont tous les points sont en mouvement maximal, et des lignes dont tous les points sont en repos. Dans un plan, ces lignes sont des hyperboles ♦ de foyers S_1 et S_2.
Le point M_0, équidistant de S_1 et S_2, vibre avec une amplitude maximale. De même le point M : $S_2 M - S_1 M$ = une longueur d'onde.
Le point M′ est au repos : $S_2 M' - S_1 M' = \frac{1}{2}$ longueur d'onde.

♦ Hyperbole : courbe définie par l'ensemble des points dont la différence des distances en deux points fixes (foyers) est constante.



Tout phénomène vibratoire peut donner lieu à des interférences. On trouvera donc des interférences mécaniques, des interférences acoustiques, des interférences lumineuses, des interférences radioélectriques.

Applications

— *Théoriques*

L'obtention d'interférences prouve la nature vibratoire d'un phénomène. C'est ainsi que les expériences de Young et de Fresnel ont établi la nature vibratoire de la lumière.

— *Pratiques*

a) Mesure des longueurs d'ondes. Les méthodes interférentielles sont utilisées pour mesurer les longueurs d'ondes de vibrations lumineuses, électriques, ou sonores (dont on déduit la vitesse de propagation).

b) Inversement, on peut comparer par interférences une longueur à une longueur d'onde donnée ; c'est ainsi qu'est défini le mètre ♦.

♦ Voir Unités.

c) Les interférences radioélectriques sont à la base des systèmes de navigation hyperboliques, dans lesquelles un récepteur permet de fixer la position d'un avion ou d'un bateau par rapport à des hyperboles tracées sur une carte (système Loran ♦, Decca, Gee, etc.).

♦ Voir l'article : l'Électronique, pages 248 et 249.

INVERSION DE POPULATION : voir Pompage et les pages 204, 322.

ION (Ion) : pages 23, 31, 81, 99, 100, 112, 139, 145, 174, 181, 197, 204, 209, 235, 253, 255, 269, 326, 329, 340, 345, 445, 481, 489, 496, 504, 510, 518, 537.

Atomes ou groupes d'atomes n'ayant pas la neutralité électrique, du fait qu'ils ont capté ou perdu un ou plusieurs électrons.

IONISATION ♦ (Ion exchange) pages 31, 64, 82, 143, 209, 210, 381, 440, 487, 490, 498, 499, 504, 539.

♦ Se reporter à l'article : la Physique des plasmas, page 460.

Production de particules chargées ou ions par extraction ou apport d'électrons. L'extraction d'électrons nécessite un apport d'énergie qui peut se faire de différentes manières : l'effet thermoélectronique ou l'effet photoélectronique produisent des ions positifs en même temps que des électrons. Le choc d'atomes ou de molécules avec d'autres, ou avec des ions préexistants, produit également des ions. C'est un processus courant dans l'ionisation du gaz.

Dans un solvant comme l'eau, les ions sont libres et peuvent se déplacer sous l'action d'un champ électrique. C'est la cause de la conductibilité de ces solutions, appelées électrolytes.

IONISATION (Chambre d') : voir Chambre d'ionisation

IONISATION (Énergie d') : voir Cellule photoélectrique page 96.

IRRADIATION (Irradiation) page 491.

Exposition aux effets des radiations provenant le plus souvent de réactions nucléaires, mais aussi de rayons X (il faut prendre radiations au sens le plus large d'émission de corpuscules : électrons, neutrons, ou de photons : X ou gamma).

L'irradiation d'une substance placée dans le cœur d'un réacteur produit des isotopes radioactifs (cobalt 60, phosphore 32, iode 128 et 137, utilisés en médecine comme source de rayons gamma [bombe au cobalt] ou comme « traceurs » permettant de suivre le mécanisme de l'absorption d'un élément et sa fixation par un organe). On utilise l'isotope radioactif pour produire, dans le voisinage de l'organe sur lequel il se fixe, une « irradiation interne ». L'irradiation a un effet destructif sur le corps humain. On peut le mettre à profit pour les traitements de radio- ou gammathérapie, mais une irradiation non contrôlée peut avoir des effets allant d'une anémie passagère à la mort, suivant la dose reçue.

On admet actuellement une dose maximale équivalente à 0,3 röntgen par semaine, dans les centres nucléaires (la dose due à la radioactivité naturelle est 100 fois plus faible). Des troubles légers apparaissent pour une dose supérieure à 20 röntgen, l'irradiation pouvant être mortelle dans 50 % des cas si la dose reçue est de 400 röntgen.

ISOLANT♦ (Insulating substance)

pages 91, 141, 155, 156, 186, 203, 208, 210, 236, 257, 486, 501

♦ Voir l'article : l'Électronique, pages 208 à 210 et page 236.

Substance mauvaise conductrice de la chaleur et de l'électricité.
Les deux conductions vont de pair, car elles sont dues aux électrons libres. Inversement, un isolant (thermique ou électrique) est une substance dans la structure de laquelle on ne trouve pas d'électrons libres ou, plus précisément, d'électrons pouvant facilement se délocaliser ♦.

♦ Voir Conduction.

ISOSPIN

C'est-à-dire spin isotopique. Nombre quantique imaginé pour rendre compte du fait que, dans les interactions fortes, protons et neutrons jouent le même rôle, alors que l'interaction électromagnétique ou l'interaction faible permettent de les différencier.
Par exemple, les pions π^+, π^0, π^- ont tous trois l'isospin 1. Ils sont identiques vis-à-vis de l'interaction forte, et leurs propriétés différentes apparaissent dans l'interaction électromagnétique : π^0 est insensible à un champ électrique, tandis que π^+ et π^- sont déviés symétriquement, ce qu'on explique par des directions différentes du vecteur ♦ isospin.

♦ Voir Aperçu mathématique, page 17.

ISOTOPE (Isotope)

pages 31, 47, 77, 88, 91, 106, 171, 250, 269, 319, 326, 351, 356, 478, 491, 508, 518, 529.

Noyaux ayant même numéro atomique Z, mais de masse atomique (ou isotopique) A différente. Autrement dit, deux noyaux isotopes ont :
— un même nombre de protons,
— un nombre différent de neutrons.
Ils différeront donc par leurs propriétés physiques (masse volumique, etc.), alors que leurs propriétés chimiques seront identiques, puisque les atomes correspondants auront le même cortège électronique.

La plupart des éléments naturels ont des isotopes stables :
— l'hydrogène naturel est composé de : 99,985 % d'hydrogène léger ${}^{1}_{1}H$, de 0,015 % d'hydrogène lourd ${}^{2}_{1}H$ ou deutérium D, et de traces (10^{-6}) de tritium ${}^{3}_{1}H$.

Des éléments, comme le fluor ou le cobalt, n'ont pas d'isotope naturel. On peut, par réaction nucléaire, introduire un ou plusieurs neutrons dans un noyau et créer ainsi des isotopes artificiels, généralement radioactifs (radio-isotopes).
C'est ainsi qu'on réalise les sources radioactives au cobalt 60, $^{60}_{27}Co$, isotope du $^{59}_{27}Co$, cobalt naturel. Rappelons également que les produits finaux stables des familles radioactives sont des isotopes du plomb ♦.
La séparation des isotopes ♦ est en général difficile. Tous les procédés utilisent la faible différence de masse entre les noyaux. Citons la diffusion gazeuse, employée à Pierrelatte, sur un mélange des fluorures d'uranium 238 et 235 ($^{238}UF_6$ et $^{235}UF_6$), passant au travers d'une paroi poreuse et s'enrichissant chaque fois en uranium 235. On peut également utiliser la centrifugation ou, pour l'eau lourde ♦, une électrolyse suivie d'une distillation.

♦ Voir le graphique page 60.

♦ Par exemple, l'uranium naturel est un mélange d'uranium 238 et d'uranium 235 ; ce dernier, qui existe en proportions très faibles, est le seul fissile. Il faut donc le séparer de l'uranium 238.

♦ Voir ce mot.

JOLIOT-CURIE (Frédéric et Irène) pages 28, 96, 296, 351, 487.

Couple de physiciens français (Frédéric est né à Paris en 1900 et mort en 1958 ; Irène est née à Paris en 1897 et morte en 1956).
Les travaux et découvertes de Frédéric et Irène Joliot-Curie sont le résultat d'un travail commun et leurs noms sont aussi inséparables que ceux de Pierre et de Marie Curie. Ayant consacré une partie de leur existence à la radioactivité, ils reçoivent tous deux le prix Nobel de Chimie en 1935.
Diplômé de l'École de physique et chimie, Frédéric Joliot devient l'assistant personnel de Marie Curie en 1925. L'année suivante, il épouse sa fille aînée, Irène. Constructeur du premier cyclotron européen au Collège de France, il y est nommé professeur de physique puis devient successivement directeur du C.N.R.S. et haut-commissaire à l'Énergie atomique.
Directrice de l'Institut du radium après la mort de sa mère, Irène Joliot-Curie, en dehors des recherches qu'elle mène avec son mari, occupe divers postes importants : sous-secrétaire d'État à la Recherche scientifique, commissaire à l'Énergie atomique, professeur à la faculté des sciences de Paris. Comme Marie Curie, elle succombe à une leucémie à la suite de ses travaux sur la radioactivité.
La principale contribution à la science des époux Joliot-Curie fut la découverte, en 1934, de la radioactivité artificielle. En bombardant de particules alpha des éléments légers tels que l'aluminium et le magnésium, ils mirent en évidence trois isotopes radioactifs : les isotopes du phosphore, de l'azote et de l'aluminium. Cette découverte constitue une étape fondamentale dans la libération de l'énergie atomique et aura, par ailleurs, un grand retentissement en médecine et en biologie.
Par la suite, Irène et Frédéric Joliot-Curie apportèrent la preuve physique de la fission du noyau de l'uranium, puis ils étudièrent les réactions en chaîne d'une pile atomique.

(Viollet)
Frédéric Joliot-Curie

Ouvrages essentiels :
La Projection de noyaux atomiques par un rayonnement très pénétrant (Hermann, Paris, 1934) ;
L'Électron positif (Hermann, Paris, 1934) ;
Radioactivité artificielle (Hermann, Paris, 1935).

Frédéric Joliot-Curie :
Deux heures de physique (Ed. Kra, Paris, 1930) ;
Étude électrochimique des radioéléments (P.U.F., Paris, 1930) ;

La Constitution de la matière et la radioactivité artificielle (Eyrolles, Paris, 1937) ;
Cinq années de lutte pour la paix (Ed. Défense de la Paix, Paris, 1954) ;
La paix, le désarmement et la coopération internationale (Ed. Défense de la Paix, Paris, 1959).

Irène Joliot-Curie :
Les Radioéléments naturels (Hermann, Paris, 1946) ;
Les Progrès récents en radioactivité et en physique nucléaire (Poulet-Malassis, Alençon, 1950).

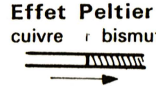
JONCTION (Junction) pages 176, 229, 236 à 240, 502, 516, 521.

Contact entre deux conducteurs de nature différente : la jonction peut se faire entre deux métaux (fer-cuivre, par exemple), entre un métal et un semi-conducteur, ou entre deux semi-conducteurs.

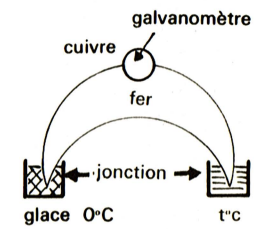
Jonction métal — métal

Suivant le sens du courant dans le circuit, une jonction entre deux métaux sera le siège d'un dégagement ou d'une absorption de chaleur (effet Peltier), mais cet effet est le plus souvent masqué par l'effet Joule.
Si deux jonctions sont à des températures différentes, il apparaît dans le circuit une force électromotrice. On a réalisé un couple thermoélectrique, qu'on utilise comme thermomètre.

Effet Peltier



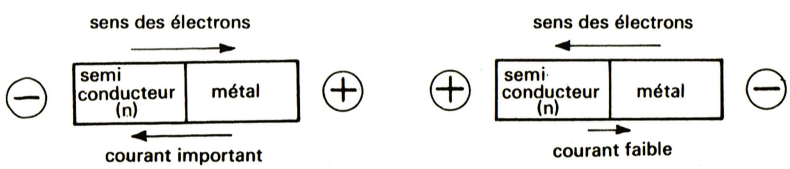
Effet thermoélectrique



Jonction métal — semi-conducteur ♦

Si on réalise une jonction métal — semi-conducteur (type *n*), on met en présence un corps riche en électrons libres (le métal) et un corps dont les électrons libres sont beaucoup moins nombreux. Lorsqu'on cherche à mettre les électrons en mouvement, les électrons du semi-conducteur quittent facilement celui-ci pour le métal. Mais, en sens inverse, le passage est plus difficile, car seuls peuvent pénétrer dans le semi-conducteur les électrons pouvant y trouver place. Résultat : la jonction fonctionne comme un redresseur, laissant passer les électrons vers le métal sans résistance, mais s'opposant au passage en sens inverse, donc n'autorisant qu'un faible courant.
Le raisonnement est analogue pour un semi-conducteur *p*, qui réalise le redressement en sens inverse.

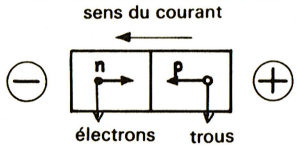
♦ Se reporter aux articles : l'Électronique, pages 237 à 240, et : le Cristal, pages 158 à 160.

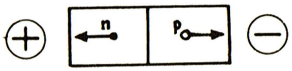


Le sens conventionnel du courant + → — correspond à un déplacement des électrons (négatifs) en sens inverse.

Jonction entre deux semi-conducteurs de type différent

L'effet redresseur apparaît aussi. La conduction est due aux électrons de la fonction *n* et aux « trous positifs » de la jonction *p*. Si la polarité est positive du côté de *p*, le courant passe.
Au contraire, si le semi-conducteur *p* est négatif par rapport à *n*, la jonction est bloquée.





les électrons ne peuvent combler les trous; aucun électron ne passe

Donc, le courant ne passe que de *p* vers *n*.

La combinaison de jonctions conduit à la réalisation des transistors.

JOULE (Joule [unit])

Unité. Le joule (J) est le travail d'une force de 1 newton qui se déplace de 1 m dans le sens de la force.

JOULE (Effet) (Joule's law)

Échauffement d'un conducteur lors du passage d'un courant. Cet effet résulte des chocs des électrons sur les particules fixes, absorbant de l'énergie apparaissant sous forme de chaleur. L'effet Joule est proportionnel au carré de l'intensité, le coefficient de proportionnalité n'étant autre que la résistance du conducteur.
La puissance P consommée par effet Joule s'exprime par la formule : $P = RI^2$ (la puissance P est exprimée en watts, la résistance R en ohms et l'intensité I en ampères).

JOULE (James) pages 187, 252, 253, 254, 315, 316, 317, 327, 496, 515, 523.

James Joule (Viollet)

Physicien anglais, né à Salford (Lancashire) en 1818, mort à Sale (Cheshire) en 1889.
Autodidacte passionné par la recherche scientifique, Joule publie à vingt ans un opuscule décrivant une machine électromagnétique de son invention. Sa vie est dès lors consacrée à la physique et de nombreux titres honorifiques, dont l'admission à la Royal Society, viennent couronner son génie.
De longues et minutieuses recherches sur la relation quantitative entre les effets électriques, mécaniques et chimiques mènent Joule à la grande découverte qui porte son nom. Déterminant la quantité de travail requise pour produire une unité de chaleur, il énonce la loi de Joule (1841) qui établit l'équivalent mécanique de la calorie. Pour obtenir ce résultat, il utilise quatre méthodes qu'il cherche à rendre de plus en plus précises.
La longue série des travaux de Joule en électricité et en thermodynamique ne fait toutefois que commencer. Il étudie ainsi le dégagement de la chaleur au cours de l'électrolyse de l'eau, émet la doctrine de la conservation de l'énergie mécanique en introduisant la notion de force vive (ancien nom de l'énergie cinétique). En collaboration étroite avec lord Kelvin, il effectue des recherches sur le travail effectué dans la compression des gaz et sur les variations de température qu'ils subissent lorsqu'ils diffusent à travers une paroi poreuse en changeant de pression (effet Joule-Thomson).

Ouvrage essentiel :
The Scientific Papers (Taylor and Francis, Londres, 1884-1887).

KAONS ou Mésons K ♦ (K Mesons)

◆ Se reporter à l'article : la physique des hautes énergies: les Particules, pages 435 à 437.

Mésons K (*ou kaons*). Particules de masse 935 fois plus grande que celle de l'électron, ce qui fait du méson K un « méson lourd ». C'est pour expliquer la production de mésons K qu'a été introduite la notion d'étrangeté, se conservant dans les réactions nucléaires.

Il existe deux groupes de kaons : les K^+ et K^0, d'étrangeté + 1,
les K^- et anti-K^0, d'étrangeté — 1,
les seconds étant les antiparticules des premiers.

Les kaons sont très instables : les formes K^+ et K^- ont une vie moyenne de 12.10^{-9} seconde et se désintègrent de différentes manières en donnant des particules plus légères, mésons légers ou leptons.

Les K^0 (sous leurs deux formes K^0_1 et K^0_2) sont encore plus instables et de vie moyenne $0{,}1.10^{-9}$ seconde.

Observés pour la première fois dans le rayonnement cosmique, les kaons sont produits dans les grands accélérateurs.

KASTLER (Alfred) pages 322, 481.

Né en 1902, ancien élève de l'École normale supérieure, Alfred Kastler a enseigné à la Faculté des sciences de Bordeaux avant d'être nommé directeur du laboratoire de physique de l'École normale supérieure en 1941. C'est à cette époque qu'il commença ses travaux sur le pompage optique ♦ qui lui valurent, en 1966, le prix Nobel de physique.

(Keystone)

Alfred Kastler

KELVIN : voir Thermomètre

KELVIN (William Thomson, Lord) pages 93, 316, 528.

◆ Voir ce mot, et Laser.

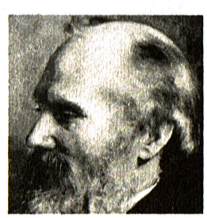
Mathématicien et physicien britannique, né à Belfast en 1824, mort près de Largs (Écosse) en 1907.

Entré à l'université de Glasgow à onze ans, le jeune Thomson publie plusieurs petits traités de physique mathématique avant ses vingt ans... Professeur de philosophie naturelle à Glasgow, il y établit le premier laboratoire britannique de physique. Anobli, président de la Royal Society, décoré de l'Ordre du Mérite, lord Kelvin voit sa brillante carrière de savant justement couronnée.

Les premières années de recherches de Thomson sont consacrées à la thermodynamique. Il propose une échelle absolue de température ♦, qui portera son nom. Puis, reprenant les travaux de Joule, de Carnot et de Clausius, il leur donne la cohésion et les précisions voulues et énonce les premiers principes de la thermodynamique dans leur forme définitive. En 1856, il énonce l'effet dit de Thomson.

◆ Voir ce mot.

En dehors de cette œuvre fondamentale, le nom de lord Kelvin est fort célèbre en électricité, surtout dans les applications télégraphiques. En 1853, il pose les bases théoriques de la future télégraphie sans fil. De 1856 à 1866, il joue un rôle de premier plan dans le projet du câble transatlantique et, à partir de ces recherches, invente le galvanomètre à miroir. Il s'intéresse alors successivement à l'électricité atmosphérique (mise au point de divers électromètres), à l'électromagnétisme (calcul de la force électromotrice absolue d'une pile Daniell), à la navigation (invention d'un procédé pour capter les sons en eau profonde, amélioration du compas, d'un indicateur et d'un analyseur harmonique de marées).



William Thomson Kelvin

Ouvrages essentiels :
Mathematical and Physical Papers (University Press, Cambridge, 1882-1911) ;
Les Unités électriques de mesure (Gauthier-Villars, Paris, 1884) ;
Conférences scientifiques et allocutions (Gauthier-Villars, Paris, 1893) ;
Baltimore Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light (Clay, Londres, 1904) ;
Elements of Natural Philosophy (University Press, Cambridge, 1922).

KIRCHHOFF (Loi de) : voir Corps noir page 143 et les pages 186, 189, 196.

KLYSTRON (Klystron) pages 233 et 234.

Tube électronique utilisé dans la technique des hautes fréquences, pour amplifier jusqu'à des puissances supérieures à 10 kW ♦ des oscillations de plusieurs milliards de hertz.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

KOSSEL (Walther) pages 321, 326, 529.

Physicien allemand, né à Berlin en 1888, mort à Tübingen en 1956.
Fils d'un chimiste et physiologiste de renom, Kossel est professeur de physique aux universités de Kiel, de Dantzig et de Tübingen. Célèbre pour avoir créé la théorie de l'électrovalence, il énonce la nature physique de la valence chimique ♦. Ses recherches sur les spectres de rayons X et de rayons gamma, fournis par les corps cristallisés, sont, par ailleurs, fort importantes. Enfin, il signale la stabilité des couches externes de huit électrons dans les atomes.

♦ Voir l'article : la Chimie et Liaison chimique.

Ouvrages essentiels :
Ueber die sekundäre Kathodenstrahlung in Gasen in der Nähre des Optimums der Primargeschwindigkeit (Trübner, Strasbourg, 1911) ;
Ueber Molekülbildung als Frage des Atombaus (Barth, Leipzig, 1915) ;
Valenzkräfte und Röntgenspektren (Springer, Berlin, 1921) ;
Die Einheit der Naturwissenschaft (Lipsius und Tischer, Kiel, 1929) ;
Vollstandiges Reflexsystem eines Krystallgitters und Messung Röntgenwellenlangen (Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen, 1935).

L

LALLEMAND (André) page 451.

Astronome français, né à Cirey (Côte-d'Or) en 1904.
Attaché à l'observatoire de Strasbourg puis à celui de Paris, Lallemand effectue de nombreux travaux en astronomie physique. Après des études sur la photométrie de la couronne solaire, il cherche à appliquer la photoélectricité à l'astronomie. Ses réalisations pratiques sont, par ailleurs, inestimables : des tubes ayant un facteur d'amplification de près de cinq cents millions qui peuvent être branchés directement sur des galvanomètres ; des photomultiplicateurs qui donnent des études de photométrie de haute précision, et, surtout, « le convertisseur électronique d'images » qui, permettant d'obtenir des spectres stellaires dans des conditions très favorables, semble appelé à jouer un rôle de premier plan dans les sciences d'observation.

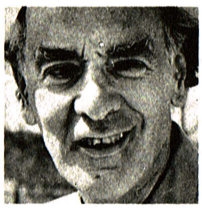
Ouvrage essentiel :
Influence de l'état physique sur les propriétés magnétiques de quelques sels de la famille du fer (Masson, Paris, 1935).

LAMBERT (Loi de) : voir Corps noir.

LAMPE : voir Tube

LANDAU (Lev Davidovitch) pages 26, 29, 202, 260, 464.

Physicien soviétique, né à Bakou en 1908, mort en 1968.
Docteur ès sciences à dix-neuf ans, Landau travaille quelques années à Copenhague, sous l'égide de Bohr, avant d'être nommé co-directeur de l'Institut des Études physiques de Moscou. Il reçoit le prix Nobel de physique en 1962.
Pionnier de la théorie du traitement mathématique du magnétisme, il ouvre la voie au ferromagnétisme. Se tournant ensuite vers l'étude des phénomènes à basse température, il propose un traitement théorique des propriétés de l'hélium 2 en termes de mécanique quantique , puis met en évidence des propriétés étonnantes de l'hélium 3 (rare isotope de l'hélium) à très basse température.


Lev Davidovitch Landau (Keystone)

LANGAGE BINAIRE : voir Calcul binaire

LANGEVIN (Paul) pages 281, 201, 412, 514.

Physicien français, né à Paris en 1872, mort en 1946.
Normalien et agrégé de sciences physiques, Langevin obtient une bourse à Cam-

bridge dans le laboratoire de J. J. Thomson. Il est ensuite nommé professeur au Collège de France puis à l'École de physique et chimie dont il devient directeur. Il est élu membre de l'Académie des Sciences en 1934.
Théoricien éminent, Langevin poursuit des travaux importants dans divers domaines de la physique : la radiation et l'étude des rayons X, l'ionisation des gaz, la biréfringence électrique et magnétique, la théorie cinétique des gaz, la théorie du magnétisme et de l'orientation moléculaire et la théorie de la relativité C'est toutefois pour sa mise au point d'un système de détection des ultra-sons, utilisé pour les sous-marins et les sondages en mer, qu'il est le plus connu. Ce précurseur du sonar est fondé sur l'utilisation des longueurs d'ondes ultrasoniques produites par l'effet piézo-électrique de Pierre Curie.

Paul Langevin (Viollet)

Ouvrages essentiels :
Recherches sur les gaz ionisés (Gauthier-Villars, Paris, 1902).
Le Principe de relativité (Chiron, Paris, 1922).
La Physique depuis vingt ans (Doin, Paris, 1923).
La Pensée et l'Action (Ed. sociales, Paris, 1964).

LANGEVIN (Voyageur de)

Une des conséquences de la relativité est que le temps n'a pas la même valeur pour un observateur fixe (par rapport à un certain repère) et un observateur en translation (par rapport à ce même repère). Pour ce dernier, le temps passe moins vite que pour le premier. Il vieillit moins vite...
Langevin imagina deux jumeaux, l'un occupant une position fixe dans un repère R, et l'autre effectuant à bord d'une fusée extrêmement rapide un voyage aller et retour intersidéral. A la fin du voyage, le jumeau cosmonaute avait moins vieilli que le jumeau resté au sol...
Ce résultat paradoxal semble vérifié par la durée de vie des muons produits par les rayons cosmiques. Leur durée de vie moyenne τ_0 correspond à un parcours de 600 m. Or ils parviennent au niveau du sol, parcourant plusieurs kilomètres. Il faut donc compter leur durée de vie τ dans leur temps propre, et non dans le nôtre, τ et τ_0 étant liés par la formule :

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

La correction s'impose ici, car, dans l'exemple du muon, le rapport $\frac{v}{c}$ vaut 0,99, ce qui donne sensiblement $\tau = 100\ \tau_0$ et un parcours moyen de 60 km.

LANGMUIR (Irving) page 326.

Physicien et chimiste américain, né à Brooklyn en 1881, mort à Falmouth (Massachusetts) en 1957.
Diplômé de l'université de Columbia, puis de Göttingen en Allemagne, Langmuir est directeur de recherches à la General Electric Company, ce qui lui permet de se consacrer à la recherche en physico-chimie. Il reçoit le prix Nobel de chimie en 1932.
Laissant souvent à d'autres le soin de trouver les applications pratiques de ses découvertes, Langmuir poursuit des recherches fondamentales en chimie et en physique et crée ainsi deux nouvelles théories : l'une sur la valence électrochimique,

à partir des travaux de Walther Kossel et de Gilbert Newton Lewis, l'autre sur la catalyse hétérogène par adsorption ♦ des gaz dans les solides. Dans le domaine de la physique, ses travaux le conduisent à étudier les décharges électriques des gaz et les émissions d'électrons. Parmi les applications les plus importantes de ses découvertes, citons l'ampoule électrique à atmosphère gazeuse et le tube électronique de transmission. D'autre part il découvre l'hydrogène atomique. N'oublions pas d'évoquer la plus pittoresque de ses inventions : la production de la pluie artificielle.

♦ Adsorption : fixation de molécules à la surface d'un solide.

Ouvrages essentiels :
Collected Works (Pergamon Press, Oxford, 1960) ;
Ueber partielle Wiedervereinigung dissocierter Gase im Verlauf einer Abkühlung (Druck von L. Hofer, Göttingen, 1906) ;
Couches moléculaires, cyclotron et nouvelle biologie (A. Michel, Paris, 1948) [en collaboration avec H. Taylor et O. Lawrence].

LAPLACE (Loi de) : voir Électricité et magnétisme page 193 et les pages 138, 173, 271, 324.

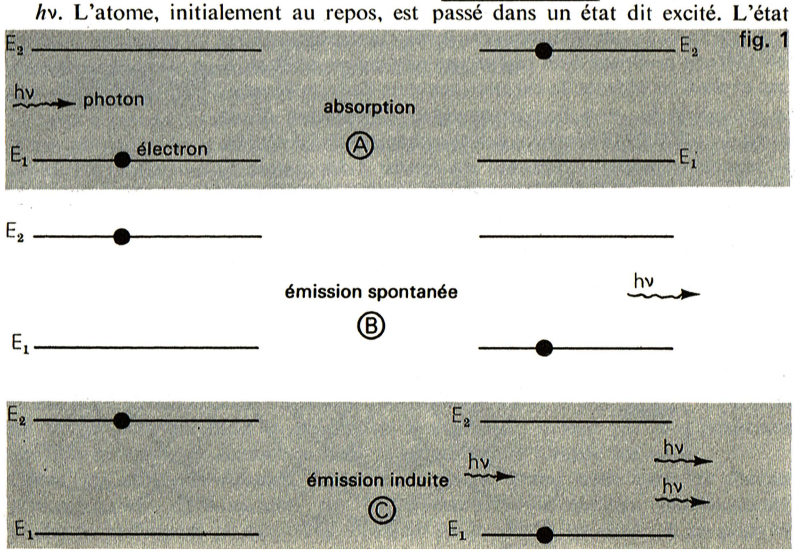
LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) pages 137, 161, 203, 204, 304, 336, 375, 404 à 408, 449, 481.

Procédé de production de lumière mis au point en 1960 aux États-Unis par T. Maiman.

Ce procédé est basé sur l'émission induite ou stimulée de la lumière par les corps. Les électrons qui gravitent autour d'un atome au repos possèdent des énergies bien déterminées dont les niveaux se répartissent d'une manière discontinue ♦ : en marches d'escalier. Si une certaine énergie est fournie à l'atome, par exemple sous forme d'un quantum de rayonnement (photon) [fig. 1] d'énergie $h\nu$ ♦, l'électron qui se trouvait dans l'état de basse énergie E_1 (fig. A), ou état fondamental, va monter après absorption du rayonnement au niveau d'énergie E_2 tel que $E_2 - E_1$ $h\nu$. L'atome, initialement au repos, est passé dans un état dit excité. L'état

♦ Voir l'article : l'Atome.

♦ $h\nu$, où h est la constante de Planck et ν la fréquence.



excité est relativement instable ; l'atome aura donc tendance à se désexciter. Il peut le faire sous deux formes :

— désexcitation spontanée (fig. B) : l'électron qui se trouvait au niveau d'énergie E_2 redescend de lui-même au niveau E_1 de basse énergie, donc stable, en émettant le même photon d'énergie $h\nu$ qui l'avait excité ;

— désexcitation stimulée ou induite (fig. C) : le retour de l'électron au niveau E_1 est déclenché par l'arrivée d'un nouveau photon d'énergie $h\nu$ qui n'est pas absorbé et continue son chemin. L'électron émet, en tombant, un nouveau photon $h\nu$. Les ondes associées au photon inducteur et au photon induit (émis) sont en phase. Le rayonnement produit par l'émission induite est donc cohérent. L'émission spontanée est, au contraire, un processus aléatoire. Dans les solides, l'émission induite est importante dans les longueurs d'ondes élevées (ondes hertziennes), tandis que, dans le domaine visible, c'est l'émission spontanée qui l'emporte. Ces phénomènes portent sur des milliards d'atomes ; il nous faut donc parler en termes statistiques. En moyenne, les électrons possédant une énergie élevée sont moins nombreux que les électrons de faible énergie (fig. 2). Statistiquement, il est donc plus probable qu'un photon incident fasse passer un électron du niveau E_1 au niveau E_2 plutôt qu'il ne provoque sa descente de E_2 à E_1. Le photon a plus de chance d'être absorbé que de provoquer l'émission induite, le rayonnement va donc s'affaiblir.

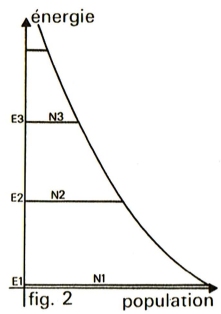


fig. 2

L'idée du Pr Alfred Kastler, qui lui valut le prix Nobel de physique, fut d'inverser cette répartition de population des niveaux d'énergie par pompage optique. Si le niveau E_2 est plus peuplé que le niveau E_1, l'émission induite sera plus probable que l'absorption et le rayonnement sera amplifié. Le schéma est en réalité complexe, car il faut faire intervenir trois niveaux d'énergie (et parfois plus) [fig. 3]. Les électrons vont être pompés du niveau 1 le plus bas au niveau 3 le plus haut par un rayonnement d'énergie E_3-E_1. Les propriétés spectroscopiques du milieu dans lequel on produit ce pompage sont telles que les électrons descendent alors, par émission spontanée, donc incohérente, du niveau 3 au niveau 2. Le niveau 2 va se remplir et jouer le rôle de réservoir d'électrons. Il suffit à ce moment d'envoyer sur les atomes un rayonnement d'énergie E_2-E_1 pour provoquer la descente simultanée de tous les électrons de E_2 à E_1, donc l'émission induite cohérente. Dans le premier laser réalisé en 1960, le pompage était réalisé par une lampe de flash ◆ de très forte puissance qui excitait les atomes de chrome contenus dans un barreau de rubis synthétique. La transition $E_2 \longrightarrow E_1$ correspondait à l'émission d'une radiation rouge de longueur d'onde 0,6943 micron. Le déclenchement de l'émission induite était obtenu par une désexcitation spontanée du niveau 2 au niveau 1.

◆ Analogue au flash électronique utilisé en photographie.

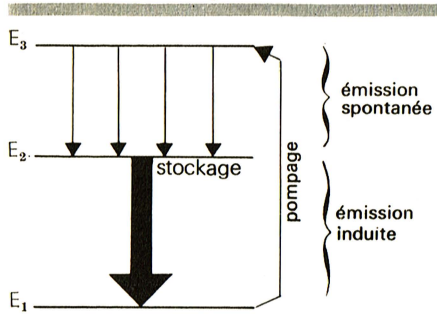


fig. 3

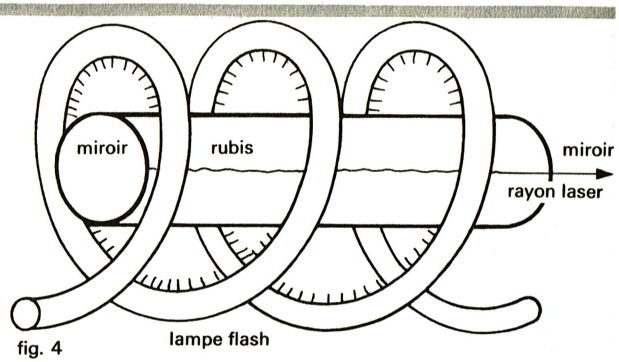


fig. 4

Le rayonnement émis serait relativement faible s'il n'était amplifié par un dispositif de cavité résonante analogue à l'interféromètre de Fabry-Pérot ♦ (fig. 4). Dans le cas du rubis, les faces des extrémités du barreau sont taillées de façon à les rendre rigoureusement planes et parallèles, puis argentées. La lumière émise à l'intérieur du barreau va donc accomplir des millions d'allers-retours à l'intérieur de la cavité. De ce fait, des ondes émises à des instants différents, par émission induite, vont être mises en phase, celles qui ne le sont pas se détruisant. L'une des faces du rubis étant seulement argentée à 96 %, le rayonnement pourra sortir.

♦ Voir l'article : l'Optique, pages 382 et 383.

— Ce rayonnement est très monochromatique. La finesse de la radiation émise est un million de fois plus grande que celle des sources les plus fines. Cela s'explique, car la longueur des trains d'onde émis, qui caractérise la longueur de cohérence, donc la cohérence temporelle de la source, est très élevée.

— La source est spatialement cohérente. Tous ses points se comportent comme des sources cohérentes entre elles, c'est-à-dire présentant une différence de phase bien définie dans le temps.

— Contrairement aux sources classiques qui émettent dans toutes les directions, le faisceau émis par le laser est rigoureusement parallèle. Le diamètre du faisceau émis par le laser à rubis décrit plus haut n'aura pratiquement pas varié à 100 m de son point d'émission.

— La puissance du faisceau laser est fantastique. Il est difficile de faire une comparaison avec d'autres sources, puisque aucune n'est aussi monochromatique. La seule comparaison valable concerne les températures du corps noir correspondant aux émissions du laser et du Soleil (par exemple) sur la même longueur d'onde. Elles est de 6 000 degrés pour le Soleil et de un million de milliards de degrés pour le laser à rubis.

Telles sont les propriétés essentielles du rayonnement émis par le laser. Depuis 1960, la technique a évolué. On a réalisé des lasers à gaz et, plus récemment, un laser chimique où le pompage est assuré par l'énergie libérée par les deux gaz mis en réaction et dans lesquels se produit l'effet laser.
Les applications sont innombrables.
Le laser a permis un développement jusque-là impensable de l'optique cohérente. Il est en passe de révolutionner les télécommunications, le faisceau servant de support à l'information à transmettre. On a déjà réalisé la transmission d'images de télévision par faisceau laser D'autre part, le parallélisme du faisceau a permis de viser la Lune et d'obtenir l'écho en retour.

LAVOISIER (Antoine Laurent de) pages 113, 141.

Chimiste français, né à Paris en 1743, mort en 1794.
Entré à vingt-cinq ans à l'Académie des sciences à la suite de deux brillants mémoires, Lavoisier est nommé fermier général et inspecteur général des poudres et salpêtres. Nommé secrétaire de la Trésorerie pendant la Révolution, il propose un projet nouveau pour la perception des impôts. Arrêté par la Convention en 1793 en tant que fermier général, il est guillotiné l'année suivante.
Génie aux multiples facettes, Lavoisier laisse un grand nom dans les charges administratives qu'il assume par ses nombreuses inventions, améliorations, études et judicieuses propositions. Pionnier de la chimie moderne, il en pose les

(Viollet)
Antoine Laurent de Lavoisier

bases avec trois principes : la pesanteur de la matière, l'utilisation systématique de la balance et la loi de conservation de la masse et des éléments.
En physique, c'est en collaboration avec Laplace que Lavoisier effectue des recherches dans le domaine de la calorimétrie. Inventeur d'un calorimètre à fusion de la glace et d'un appareil qui permet d'en mesurer les dilatations linéaires et cubiques, il détermine diverses valeurs de chaleurs spécifiques, il est l'auteur des premières mesures calorimétriques.

Ouvrages essentiels :
Œuvres (A. Michel, Paris 1955) ;
L'Air et l'eau (Colin, Paris, 1923) ;
Traité élémentaire de chimie (Gauthier-Villars, Paris, 1964).

LAWRENCE (Ernest Orlando) page 169.

Physicien américain, né à Canton (South Dakota) en 1901, mort à Palo Alto (Californie) en 1958.
Professeur de physique et directeur du Laboratoire de radiation à l'université de Californie, Lawrence reçoit le prix Nobel de physique en 1939.
Faisant autorité en physique nucléaire et biologique, Lawrence invente le cyclotron (1931), moyen d'accélérer les particules nucléaires à des vitesses très élevées. Par la suite, il en supervise la construction dans son université. Il poursuit également des recherches sur la structure atomique, sur la radioactivité artificielle, sur l'émission thermoélectronique, sur l'effet photoélectrique dans les vapeurs et sur la physique biologique. Pendant la Seconde Guerre mondiale, il contribue à la construction de la bombe atomique en isolant l'uranium 235 par le spectrographe de masse.

Ouvrage essentiel :
Couches moléculaires, cyclotron et nouvelle biologie, en collaboration avec H. Taylor et I. Langmuir (A. Michel, Paris, 1948).

LE CHATELIER (Henry)

Chimiste français, né à Paris en 1850, mort à Miribel-les-Échelles (Isère) en 1936.
Élève de l'École polytechnique puis de l'École des mines, Le Chatelier devient professeur de chimie générale et industrielle. Membre de l'Académie des sciences, il fonde la « Revue de Métallurgie ».
Au cours de sa longue carrière, Le Chatelier poursuit des travaux sur les métaux et alliages, sur les ciments, sur la céramique, sur les combustibles et sur les explosifs.
Célèbre pour ses études sur les équilibres chimiques, il énonce le principe général de déplacement des équilibres physicochimiques (loi de Le Chatelier). Ses recherches sur les températures élevées l'amènent à utiliser, pour les mesurer, des couples thermoélectriques. Inventeur du pyromètre optique ♦, il perfectionne également le microscope pour examiner les sections métallographiques.
Professeur de valeur et écrivain prolixe, Le Chatelier s'est longtemps érigé en défenseur d'une réforme en vue d'une meilleure organisation du travail.

♦ Pyromètre optique : thermomètre permettant d'évaluer les hautes températures par l'étude du rayonnement émis par les corps étudiés (basé sur la loi de Stefan).

Ouvrages essentiels :
Le Grisou (Gauthier-Villars, Paris, 1892) ;
Recherches sur la dissolution (Dunod, Paris, 1897) ;
Mesure des températures élevées (Carré et Naud, Paris, 1900) ;

La Silice et les silicates (Hermann, Paris, 1914) ;
La Métallographie microscopique (Dunod, Paris, 1915) ;
Les Explosifs (Dunod, Paris, 1915) ;
Science et Industrie (Flammarion, Paris, 1925) ;
Introduction à l'étude de la métallurgie. Le chauffage industriel (Dunod, Paris, 1925) ;
L'Industrie, la science et l'organisation au XXe siècle (Dunod, Paris, 1935) ;
De la Méthode dans les sciences expérimentales (Dunod, Paris, 1936).

LE CHATELIER (Loi de) : voir Équilibre page 254 et les pages 117, 118, 324.

LENTILLE (Lens) pages 268, 305, 343, 344, 450, 512.

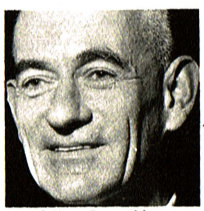
Système optique transparent qui, par réfraction, fait varier la convergence d'un faisceau.
Par analogie, on nomme lentilles, en optique électronique, des dispositifs modifiant la convergence d'un faisceau d'électrons par action de champs électriques (lentilles électrostatiques) ou magnétiques (lentilles magnétiques). De tels dispositifs se trouvent dans les microscopes électroniques ainsi que dans les téléviseurs, pour régler la netteté de l'image.

LENZ (Heinrich, Friedrich) pages 201, 309.

Physicien balte, né à Dorpat (actuellement Tartu) en 1804, mort à Rome en 1865. Professeur à l'université de Saint-Pétersbourg et membre de l'Académie des sciences de cette même ville, Lenz doit sa célébrité à ses recherches en électricité. Parallèlement à Faraday, il effectue des recherches sur l'induction électrique et donne en 1833 une description générale du sens des courants induits (loi de Lenz) : un courant induit par des forces électromagnétiques produit toujours des effets qui s'opposent à ces forces. Par ailleurs, il découvre et mesure la relation entre la température et la résistance électrique des métaux, et étudie l'influence de la vitesse sur le courant des machines d'induction.

LEPRINCE-RINGUET (Louis) page 490.

Physicien français, né à Alès en 1901.
Ancien élève de l'École polytechnique, avant d'y être professeur puis détenteur de la chaire de physique nucléaire au Collège de France, Leprince-Ringuet effectue ses premiers travaux sur les neutrons dans le laboratoire de Maurice de Broglie. Spécialisé dans l'étude des rayons cosmiques, il fait installer un laboratoire de haute montagne près du mont Blanc, puis des chambres de Wilson au pic du Midi de Bigorre. Ses recherches l'amènent à mettre en évidence des propriétés des mésons lourds et des hypérons ♦, ainsi qu'à préciser la masse exacte de plusieurs sortes de mésons.


Louis Leprince-Ringuet (Keystone)

♦ Voir l'article : la physique des hautes énergies : les Particules.

Ouvrages essentiels :
Les Transmutations artificielles (Hermann, Paris, 1933) ;
Recherches sur l'interaction avec la matière de particules de très grande énergie (Masson, Paris, 1936) ;
Les Rayons cosmiques (A. Michel, Paris, 1948) ;
Des atomes et des hommes (Gallimard, Paris, 1969).

LEPTONS ♦ (Leptons) pages 100, 205, 260, 317, 349, 354, 413, 438, 439, 440.

♦ Se reporter à la physique des hautes énergies : les Particules.

Particules élémentaires dont les caractéristiques sont leur faible masse, leur spin demi-entier et leur indifférence aux interactions fortes.
Ce sont :
— l'électron ;
— le muon, ou lepton mu, de masse 207 fois celle de l'électron, et de même charge que celui-ci ;
— le neutrino, de masse très faible ;
— leurs antiparticules, de charges opposées : le positron, le muon positif et l'antineutrino (ce dernier de charge nulle, comme le neutrino).
Au cours des interactions faibles, le « nombre leptonique » ♦ se conserve.

♦ Voir ce mot.

LEWIS (Gilbert Newton) pages 23, 81, 126, 321, 326, 529.

Physicien et chimiste américain, né à Weymouth (Massachusetts) en 1875, mort à Berkeley en 1946. Après des études à Harvard et en Allemagne, Lewis entre au laboratoire de chimie physique du Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.), puis devient professeur de chimie à Berkeley.
Le premier à saisir la signification de la paire d'électrons dans la structure moléculaire, Lewis étudie les électrons périphériques des atomes et en déduit une interprétation de la covalence ♦. Il isole, par ailleurs, l'isotope lourd de l'hydrogène. Proposant le mot « photon » pour dénommer le quantum d'énergie rayonnante, il contribue par ses recherches à éclaircir les phénomènes complexes de la fluorescence et de la phosphorescence ♦.

♦ Voir Liaison chimique.

♦ Voir Luminescence.

Ouvrage essentiel :
The Anatomy of Science (Yale University Press, New Haven, 1926).

LIAISON CHIMIQUE ♦ (Chemical link) pages 112, 113, 116, 131, 155, 156, 157, 165, 202, 209, 236, 238, 272, 409, 445, 449, 502, 529.

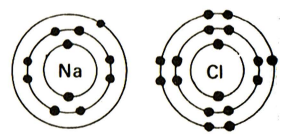
♦ Se reporter à l'article : la Chimie, pages 112 et 113.

La théorie de la liaison chimique, c'est-à-dire la manière dont deux atomes peuvent se combiner pour former un composé, n'a pu faire de progrès décisifs qu'après la découverte de l'électron.
Dès 1916, Gilbert Newton Lewis et Irving Langmuir, aux U.S.A., Walter Kossel en Allemagne, firent remarquer la stabilité remarquable des gaz rares ♦, éléments dont la couche externe comporte 8 électrons, soit 4 doublets électroniques ♦. Ils émirent l'hypothèse suivant laquelle les atomes tendent à acquérir cet état de stabilité maximale par échanges d'électrons. C'est la « règle de l'octet ». Cette théorie est encore valable dans ses grandes lignes.
Les deux grands types de liaison sont la liaison covalente et la liaison ionique.

♦ Voir ce mot.

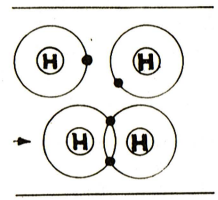
♦ Voir Acide.

Liaison ionique
Dans un composé du type chlorure de sodium (NaCl) (sel marin), le sodium est un atome comportant un seul électron sur sa couche externe. Le chlore, lui, en possède 7. On peut les représenter par les schémas très élémentaires ci-contre. Le chlore capte l'électron unique de la couche externe du sodium, et acquiert ainsi une couche externe complète à 8. Pour le sodium, c'est désormais la couche n° 2 qui est la couche externe, elle est complète à 8 électrons et le sodium est devenu un ion positif (puisqu'il a perdu un électron). Les deux ions (Na^+, Cl^-) s'attirent par action électrostatique. On a alors un composé ionique.
Cette formation de doublets électroniques est conforme aux règles d'occupation des orbitales, qui peuvent contenir chacune deux électrons au maximum.

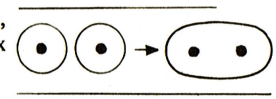


Liaison covalente

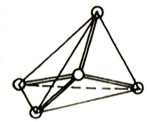
Dans une molécule comme l'hydrogène gazeux H_2, à deux atomes, la liaison est différente. Les deux électrons « célibataires », provenant chacun d'un atome, forment un doublet qui est commun aux deux atomes. En d'autres termes, les électrons, qui occupaient chacun une orbitale d'un des atomes, forment désormais une orbitale commune, dite orbitale moléculaire, entourant les deux atomes. La représentation classique de l'orbitale, c'est-à-dire le volume à l'intérieur duquel on a 90 % de chances de trouver l'électron de l'atome H, est une sphère centrée sur le noyau. Après formation de la liaison, le volume correspondant à la même probabilité de présence est un ellipsoïde ♦ enveloppant les deux noyaux, dont la distance devient inférieure au diamètre des sphères initiales.
Il y a eu « recouvrement des orbitales ». Effectivement, à l'intérieur de ce volume, la probabilité de présence d'un électron est maximale sur l'axe portant les deux protons, à égale distance de ceux-ci. On a réalisé une liaison « covalente ».

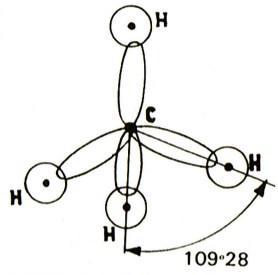


♦ Ellipsoïde : volume à section elliptique.



On conçoit que liaison ionique et liaison convalente soient différentes ; la liaison ionique n'est pas directive, les forces électrostatiques s'exerçant de la même façon dans tous les azimuts. Elle ne résiste pas davantage à la dissolution dans un solvant comme l'eau, qui divise ces forces par 80 et provoque la mise en liberté des ions au sein du solvant.
Au contraire, la liaison covalente est dirigée (comme le suggère la forme des orbitales). Ainsi, les 4 électrons de valence du carbone occupent chacun une orbitale hybride sp_3 dont l'axe est celui qui joint le noyau C, placé au centre d'un tétraèdre régulier à l'un des sommets.
La combinaison des orbitales avec celles des 4 électrons provenant d'atomes H donne la molécule de méthane $C\,H_4$, de forme tétraédrique.
On comprendra également que la liaison covalente soit plus forte que la liaison ionique. Cela se traduit par une stabilité plus grande et une ionisation difficile. Ces deux types de liaisons sont extrêmes. En fait, une liaison n'est pas, en général, complètement ionique ou covalente. Pauling a étudié le passage d'un mode à l'autre et classé les éléments suivant leur tendance à s'ioniser positivement (éléments électropositifs) ou négativement (éléments électronégatifs). Deux éléments donnent entre eux une liaison d'autant plus ionique qu'ils sont éloignés dans l'échelle de Pauling. En gros, l'électropositivité d'un élément décroît du bas vers le haut et de gauche à droite du tableau de la classification périodique ♦.





♦ Voir pages 42 et 43.

Autres types de liaisons

— *La liaison semi-polaire* : un doublet entier est fourni à un atome (accepteur) par un autre (donneur). Le résultat est très proche de la liaison covalente normale.
— *La liaison hydrogène* se rapproche plutôt de la liaison ionique : dans un cristal de glace, les molécules d'eau sont liées par des liaisons de ce type, qui expliquent les anomalies de l'eau : glace moins dense que l'eau, point de fusion élevé pour un corps de ce type, etc.

LINDE (Karl von)

Inventeur allemand, né à Berndorf (Franconie) en 1842, mort à Munich en 1934. Des études et une carrière d'ingénieur mènent l'esprit inventif de Linde à effectuer de nombreuses découvertes pratiques.
Il effectue des recherches sur les très basses températures qui seront importantes en physique moderne. Utilisant l'effet Joule-Thomson, il produit de l'air liquide

en 1895. Peu après, il met au point un système permettant de préparer de l'azote gazeux et de l'oxygène liquide presque purs.
Pionnier en matière de réfrigération, il construit en 1874 le premier réfrigérateur à compression utilisant l'éther méthylique (CH_3 OCH_3). Deux ans plus tard, il remplace ce dernier par l'ammoniac (NH_3).

Ouvrage essentiel :
Physik und Technik auf dem Wege zum absoluten Nullpunkte der Temperatur (Munich, 1912).

LINÉAIRE (Accélérateur) : voir Accélérateurs

LIPPMANN (Gabriel)

Physicien français, né à Hollerich (Luxembourg) en 1845, mort sur le paquebot « France » en 1921.
Ancien élève de l'École normale supérieure, professeur à la Sorbonne et membre de l'Académie des sciences, Lippmann reçoit le prix Nobel de physique en 1908. Doué d'un esprit fort curieux et très indépendant, Lippmann partage toute sa vie entre la recherche et l'enseignement. Ses travaux les plus importants se situent en électricité, en thermodynamique, en optique et en photochimie. Il prévoit la réversibilité du phénomène de piézo-électricité du quartz, qui sera vérifiée par Pierre Curie, et étudie la polarisation des piles. Inventeur du procédé de photographie en couleur, il en est récompensé par le prix Nobel.

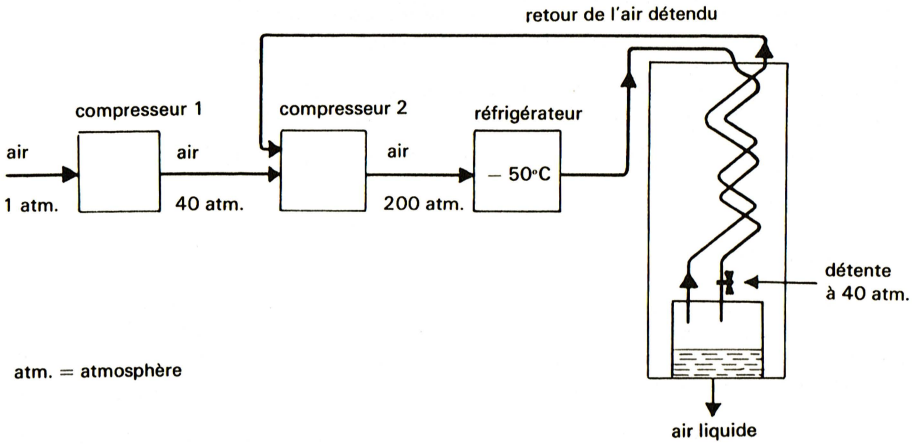
Ouvrages essentiels :
Cours de thermodynamique (Carré, Paris, 1889) ;
Leçons d'acoustique et d'optique (Hermann, Paris, 1899) ;
Unités électriques absolues (Carré et Naud, Paris, 1899).

LIQUÉFACTION (Liquefaction) pages 258, 479.

Passage d'un gaz à l'état liquide.
Tous les gaz sont liquéfiables, plus ou moins facilement. Le dernier gaz réfractaire, l'hélium, fut liquéfié en 1908 par Kammerling Onnes dans son laboratoire de Leyde, à la température de 4,2 degrés absolus (environ — 269 °C).

Techniques de liquéfaction des gaz
Elles sont, à peu de choses près, de deux types suivant que les gaz sont facilement ou difficilement liquéfiables :
— Pour les gaz facilement liquéfiables, un simple refroidissement ou un refroidissement accompagné d'une compression suffisent. C'est le cas de l'ammoniac, de l'anhydride carbonique.
— Pour des gaz comme l'oxygène, l'azote (ou l'air, mélange de ces deux gaz), on doit effectuer des refroidissements en cascade, afin d'amener le gaz à une température inférieure à sa température critique, au-dessus de laquelle on ne peut espérer la liquéfaction (procédé Linde, procédé G. Claude).
Dans le procédé Linde, on comprime l'air à 200 atmosphères par 2 compressions successives et on le refroidit à — 50 °C, puis on le laisse se détendre jusqu'à 40 atmosphères ♦. Cette opération refroidit l'air qui est renvoyé au 2e compresseur. Ce retour se fait dans un tube annulaire entourant l'air sortant de ce compresseur. Il y a donc refroidissement de celui-ci.

♦ 40 atmosphères ou 40 fois la pression atmosphérique.



L'air recyclé par le compresseur 2 est, au bout d'un moment, suffisamment froid pour que la détente à 40 atmosphères abaisse la température à — 140 °C. L'air se liquéfie alors.

Le procédé G. Claude diffère du précédent en ce que la détente de l'air se fait en partie dans un moteur, et produit de l'énergie.

Ces deux procédés sont utilisables pour tous les gaz : le procédé Linde permet de liquéfier l'hydrogène, préalablement refroidi par l'air liquide et comprimé à 160 atmosphères. Pour l'hélium, on utilise le procédé G. Claude.

Les gaz liquéfiés doivent être conservés à des températures suffisamment basses pour qu'ils puissent rester à l'état liquide. C'est ainsi que l'azote ou l'oxygène liquides sont conservés dans des vases de Dewar ♦, à l'air libre, et où l'on ne peut empêcher une ébullition lente de se produire.

♦ Vases de Dewar : vases analogues aux bouteilles thermos, c'est-à-dire à deux parois séparées par un espace où on a fait le vide.

Voici quelques températures d'ébullition à la pression atmosphérique normale, ainsi que les températures critiques :

	Température critique	*Température d'ébullition*
hélium	— 268 °C	— 268,9 °C
hydrogène	— 239,9 °C	— 253 °C
azote	— 147,1 °C	— 195,8 °C
oxygène	— 118,8 °C	— 183 °C
gaz carbonique	+ 31 °C	— 78 °C
eau	+ 374,2 °C	+ 100 °C

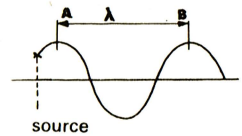
LIQUIDE (Etat) (Liquid State) pages 148, 172, 175, 177, 181, 209, 255, 256, 264, 269, 270, 305, 334, 348, 356, 441, 444, 449, 454, 479, 483, 504, 514, 530, 531.

État fluide de la matière, dans lequel les molécules ou les ions ont une agitation thermique suffisante pour échapper en partie aux attractions des corpuscules voisins ♦.

♦ Voir : États, Fusion, Liquéfaction.

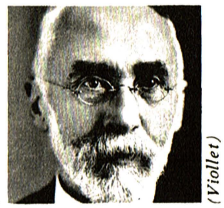
LONGUEUR D'ONDE (Wave Length) pages 97, 114, 144, 174, 195, 208, 224, 264, 270, 310, 311, 312, 322, 331, 341, 342, 343, 347, 358, 359, 449, 452, 487, 490, 491, 496, 507, 527, 528, 533, 539.

Lorsqu'une houle régulière s'établit sur la mer, les crêtes des vagues sont régulièrement espacées. On pourrait appeler longueur d'onde de la houle la distance entre deux crêtes successives.



Plus généralement, quand une vibration (ou perturbation périodique) se propage dans une direction donnée, on trouve des points qui, au même instant, sont dans le même état, par exemple élongation maximale vers le haut (crête de la vague) ou vers le bas (creux de la vague).
On appelle longueur d'onde λ la distance AB entre deux points consécutifs dans le même état. La longueur d'onde est liée à la fréquence de la source par la relation : $\lambda = \frac{C}{N}$, C étant la célérité (ou vitesse) de propagation de la vibration dans le milieu, N étant la fréquence.

LORENTZ (Hendrik Antoon) pages 33, 36, 198, 280, 289, 339, 342, 494.

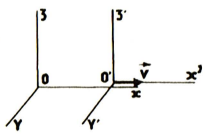

(Viollet)
Hendrik Antoon Lorentz

Physicien néerlandais, né à Arnhem en 1853, mort à Haarlem en 1928.
Professeur de physique mathématique à Leyde, puis directeur de recherches à l'Institut de Haarlem, Lorentz se consacre à de nombreuses recherches en divers domaines de la physique, mais son œuvre est centrée sur la recherche d'une théorie cohérente de l'électricité, du magnétisme et de la lumière.
Partant de la notion d'éther pour expliquer ces phénomènes, le savant néerlandais essaie de reprendre toutes les théories de l'électricité à partir de la présence d'électrons dans la matière. Des difficultés s'élevant alors, il introduit la notion de temps local et arrive en 1904 aux équations de Lorentz qui permettront à Einstein d'élaborer sa théorie de la relativité restreinte.
D'autre part, Lorentz met en application la théorie de Maxwell sur le rapport entre l'indice de réfraction et la densité d'un milieu, essaie d'expliquer l'hypothèse selon laquelle la dispersion optique est due à des vibrations sonores, étudie le champ électrodynamique d'un système se déplaçant à une vitesse uniforme, interprète l'effet Zeeman et prédit les effets de polarisation.

Ouvrages essentiels
Leerboek der differentiaal- en integraal-rekening (Brill, Leyde, 1882) ;
Over het verband tusschen de voortplantingssnelheid van het licht (Van der Post, Amsterdam, 1879).

LORENTZ (Transformations de) (Lorentz transformations)
pages 339, 494.

Série d'équations permettant de passer d'un système d'axes à un autre se déplaçant par rapport au premier. Elles sont basées sur deux hypothèses : le temps n'a pas le caractère absolu comme en physique classique. De plus, dans l'espace-temps à 4 dimensions (espace de Minkowski), l'intervalle entre deux événements ne dépend pas du système de référence choisi.
Dans le cas de la figure ci-contre, si x, y, z, t sont les coordonnées d'espace et de temps d'un point dans le système O, et si x', y', z', t' ses coordonnées dans le système O′ se déplaçant par rapport à O avec la vitesse V,



$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}},\ y = y',\ z = z',\ t = \frac{t' + \frac{V}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}.$$

La transformation de Lorentz est à la base de la physique relativiste.

LUMIÈRE ♦ (Light) pages, 29, 57, 96, 115, 137, 144, 178, 179, 182, 183, 198, 207, 211, 217, 235, 255, 258, 261, 264, 267, 268, 274, 277, 304, 310, 312, 321, 331, 338, 341, 344, 350, 352, 356, 358, 363, 408, 410, 416, 419, 422, 425, 434, 440, 441, 442, 449, 451, 452, 480, 481, 487, 494, 496, 503, 506, 507, 511, 512, 518, 532, 533, 534, 537, 538.

♦ Se reporter à l'article : l'Optique.

La théorie actuelle sur la nature de la lumière est une harmonieuse synthèse de deux théories successives, celle de Newton : la lumière est une émission de corpuscules, et celle de Huygens : la lumière est une vibration se propageant dans les milieux transparents. La réalisation d'interférences lumineuses par Young et par Fresnel prouve la nature vibratoire de la lumière. Maxwell montre que l'onde lumineuse est due à la propagation de deux champs, électrique et magnétique, perpendiculaires à la direction de propagation. C'est donc une onde électromagnétique. Seul l'effet photoélectrique (ou photoélectronique) ne confirme pas cette hypothèse; on ne peut, en effet, expliquer l'extraction d'un électron que par l'apport, d'un seul coup, de l'énergie nécessaire.
Reprenant l'hypothèse du photon (Planck, 1900) Einstein explique l'effet photoélectrique en 1905 par l'intervention de photons d'énergie suffisante.
La lumière présente donc à la fois un aspect ondulatoire et un aspect corpusculaire. Une radiation lumineuse sera caractérisée par sa couleur, donc par sa longueur d'onde λ (dans le vide) ou par sa fréquence ν, liées par la relation $\lambda = \frac{c}{\nu}$ (c = célérité de la lumière).

Le photon correspondant est caractérisé par son énergie $W = h\,\nu$ (où h est la constante de Planck $= 6{,}62.10^{-34}$), d'autant plus grande que la fréquence est grande, donc que la longueur d'onde est courte.
La lumière visible correspond à des longueurs d'onde (dans le vide) comprises entre 0,4 et 0,8 micron. En dessous de 0,4 micron se trouve le domaine des rayons ultraviolets. Au-dessus de 0,8 micron, c'est le domaine des infrarouges.

LUMINESCENCE (Luminescence) pages 196, 273, 449, 457, 461, 513.

Il arrive qu'une substance éclairée par une radiation de longueur d'onde convenable réémette de la lumière. C'est la luminescence, qui peut prendre deux formes :
— la fluorescence, qui dure le temps de l'excitation ;
— la phosphorescence, qui subsiste plus ou moins longtemps après l'excitation.
On explique ce dernier phénomène par deux processus : l'excitation produit dans les cristaux une extraction d'électrons par effet photoélectrique. Ces électrons, pris dans l'agitation thermique du cristal, ne retrouvent leur place qu'au bout d'un temps plus ou moins long, en émettant un photon à ce moment seulement.

M

MACH (Ernst) pages 285, 349.

Physicien et philosophe autrichien, né à Turas (Moravie) en 1838, mort à Haar, près de Munich, en 1916.
Successivement professeur de mathématiques à Gratz, de physique à Prague et de philosophie à Vienne, Mach se distingue en physique par ses recherches en optique et en acoustique. Son nom est ainsi associé au « nombre de Mach », qui donne le rapport de la vitesse d'écoulement d'un fluide à la vitesse locale du son, ce qui met en évidence le rôle de la vitesse du son en aérodynamique.
D'un esprit rigoureusement objectif, l'œuvre de Mach influencera considérablement la pensée du XXe siècle, tant sur le plan scientifique que sur celui de la pensée philosophique. Fondateur de l'« empiriocriticisme », théorie philosophique empiriste, il introduit en science la notion de critères de vérification rigoureux. C'est ainsi qu'il est amené à une critique sérieuse des principes de la dynamique newtonienne, critique qui ouvre la voie à la théorie de la relativité d'Einstein.

Ouvrages essentiels :
Die Analyse der Empfindungen und das Verhältniss des Physischen zum Psychischen (Fischer, Iena, 1902).
La Mécanique, exposé historique et critique de son développement (Hermann, Paris, 1904).
La Connaissance et l'erreur (Flammarion, Paris, 1908).

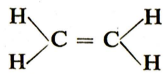
MACH (nombre de) (Mach number) pages 285, 332, 349.

En aérodynamique, la vitesse V d'un mobile importe moins que la comparaison de celle-ci à la vitesse du son V_s. C'est au rapport $\frac{V}{V_s} = M$ qu'on donne le nom de nombre de Mach. Il doit son importance au fait que la vitesse (ou célérité) du son varie avec les conditions de température et de pression, et que les phénomènes de « compressibilité » altérant les qualités aérodynamiques d'une aile d'avion apparaissent non à une vitesse déterminée, mais à un nombre de Mach déterminé. Le fameux « mur du son » correspond évidemment à $M = 1$.

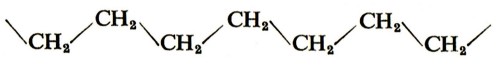
MACROMOLÉCULES (Macromolecules) pages 107, 164, 478, 481.

Molécules comportant un nombre d'atomes très élevé, obtenues en général par la réunion de motifs de masse moins élevée, soit par condensation, soit par polymérisation.
Les macromolécules ont une importance pratique énorme : elles constituent la majeure partie des plastiques (polyéthylènes, polychlorures de vinyle, résines urée-formol, etc.) et des textiles naturels ou synthétiques.

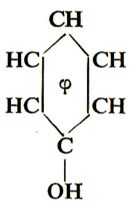
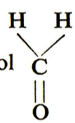
Exemples de macromolécules

— une polymérisation : l'éthylène 

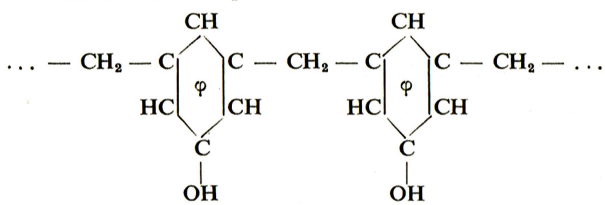
donne par polymérisation le polyéthylène (avec n $\simeq$ 500 à 1 000) :



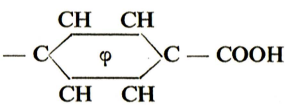
— une condensation ♦ :

le phénol  se condense avec le formol 

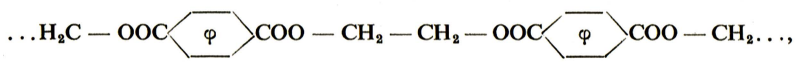
avec élimination d'eau pour donner le motif :



qui constitue la bakélite, ou ancêtre des plastiques synthétiques.
Un diacide peut également réagir sur un dialcool pour donner un polyester, chaîne présentant un très grand nombre de fois la fonction ester, définie par la réaction : acide + alcool ⟶ ester + eau.

Par exemple : l'acide téréphtallique 

et le glycol $HOH_2C - CH_2OH$
réagissent pour donner, avec élimination d'eau, un polyester :



le polytéréphtallate de glycol, plus connu sous le nom de tergal. Si l'on ajoute à ces exemples les polyamides, dont le plus célèbre est le nylon, on comprendra l'intérêt que porte la chimie moderne aux macromolécules.

♦ Condensation : réunion de deux corps avec élimination d'une substance telle que l'eau, l'acide chlorhydrique, etc., de masse molaire faible par rapport aux substances initiales.

MAGNÉTISME ♦ (Magnetism)

voir l'article Électricité et magnétisme pages 184 à 203 et les pages 26, 28, 45, 82, 100, 101, 257, 260, 271, 276, 319, 320, 330, 334, 339, 343, 356, 412, 423, 438, 457, 498, 505, 535, 536.

♦ Se reporter à l'article : Électricité et magnétisme.

Cette partie de la physique, primitivement consacrée aux aimants, traite plus généralement des causes et des effets des champs magnétiques. Si les aimants

naturels (magnétite ou oxyde magnétique de fer = Fe_3O_4) sont connus depuis l'Antiquité, il faut attendre le XIXe siècle pour se rendre compte que non seulement le fer, le nickel et le cobalt sont susceptibles de s'aimanter, mais que toutes les substances présentent cette propriété.
On distingue :
— les diamagnétiques, qui s'aimantent facilement en sens inverse du champ extérieur ;
— les paramagnétiques, qui s'aimantent facilement dans le sens du champ extérieur ;
— les ferromagnétiques, dont l'aimantation est importante et dans le sens du champ.
Il faudrait y ajouter les antiferromagnétiques et les ferrimagnétiques, dont l'existence a été prouvée expérimentalement après avoir été admise comme une conséquence de la théorie quantique du magnétisme.

MAGNÉTISME NUCLÉAIRE (Nuclear magnetism)

pages 145, 191, 260.

Magnétisme dû au spin des particules du noyau lui-même (et non aux électrons), mis en évidence par l'existence de raies spectrales pouvant se dédoubler en raies très voisines (structure « hyperfine »).

MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE (Magnetohydrodynamics)

page 463.

Étude des milieux conducteurs fluides (liquides ou plasmas). C'est l'application des lois de la mécanique des fluides au mouvement des charges du milieu sous l'action d'un champ magnétique.
Cette science nouvelle a permis de réaliser les « bouteilles à plasma » permettant de maintenir à l'écart des parois matérielles un plasma dans lequel on réalise — ou tente de réaliser — des fusions nucléaires. On lui doit également des générateurs M.H.D. ♦, dans lesquels un champ magnétique sépare les ions positifs et les électrons d'un plasma à grande vitesse et produit un courant dans un circuit d'utilisation.

♦ M.H.D. : magnétohydrodynamique.

MAGNÉTON (Magneton) page 536.

Moment magnétique élémentaire dont tous les moments magnétiques seraient des multiples, suivant l'hypothèse de Bohr.
Il faut distinguer le magnéton électronique, ou magnéton de Bohr, et le magnéton nucléaire, intervenant dans l'interprétation du magnétisme nucléaire.

Magnéton de Bohr

Le moment magnétique d'un électron tournant autour d'un noyau est quantifié. Il ne peut être que multiple d'une valeur élémentaire, le magnéton de Bohr, qui s'exprime en fonction de la charge de l'électron e, de sa masse m et de la constante de Planck h, par la formule : $\frac{eh}{4\pi m} = 0{,}927.10^{-23}$ (A × m² ♦).

♦ Ampère × m², unité du moment magnétique dans le système international.

Magnéton nucléaire

Le noyau lui-même ayant un moment magnétique, on considère un « magnéton nucléaire » qui est 1 840 fois plus petit que le précédent, puisque le proton a une masse 1 840 fois supérieure à celle de l'électron.

MAGNITUDE (Magnitude) page 442.

Les astronomes classent les étoiles suivant leur éclat ; les classer suivant leur taille ne signifierait pas grand-chose, puisqu'une étoile très brillante peut apparaître, si elle est très loin, comme moins visible qu'une autre plus proche, mais moins brillante.
Ptolémée avait catalogué les 1 028 étoiles connues en 6 grandeurs : les étoiles les plus brillantes étaient dites de « première grandeur » (Sirius, Véga) et les moins visibles de « sixième grandeur » (Eridan).
On a conservé, sous le nom de magnitude, cette notion rendue plus objective. L'éclat est déterminé par des mesures photométriques : il se trouve que l'éclat d'une étoile de première grandeur est 150 fois plus important que celui d'une étoile de sixième grandeur. On remarque que $\frac{1}{150} = (0,4)^5$.

La correspondance entre éclat et magnitude est alors établie de la façon suivante :
Si E_1 est l'éclat d'une étoile de magnitude 1,

E_6 est l'éclat d'une étoile de magnitude 6,

E est l'éclat d'une étoile de magnitude m, on aura $\frac{E_6}{E_1} = (0,4)^5$, ou

$$E_6 = E_1 \times (0,4)^5 = E_1 (0,4)^{6-1}.$$

Pour une étoile d'éclat E, on définira de même la magnitude m par :

$$E = E_1 \times (0,4)^{m-1}$$

où E_1 est l'éclat de l'étoile à laquelle sont comparées les autres (Aldebaran).

MARIOTTE (Edme) pages 85, 135, 138, 173, 335.

Physicien français, né à Dijon vers 1620, mort à Paris en 1684.
Prieur de l'abbaye de Saint-Martin-sous-Beaune, Mariotte apparaît comme l'un des savants les plus féconds de la seconde moitié du XVIIe siècle. Il contribue à établir la physique expérimentale, et ses travaux en ce domaine sont extrêmement variés. S'occupant d'hydraulique, il vérifie la loi sur l'écoulement des fluides et décrit les propriétés du vase à écoulement constant. On lui doit, entre autres, un baromètre pour mesurer l'altitude, ainsi que des études sur la congélation de l'eau, la chute des corps, le mouvement des fluides et la déformation élastique des solides.
C'est toutefois à la « loi de Mariotte » sur la compressibilité des gaz que cet abbé physicien doit sa célébrité — loi dont il partage d'ailleurs la découverte avec Boyle.
Entré à l'Académie des sciences en 1666, Mariotte en est un des premiers membres.

Ouvrages essentiels :
Nouvelle découverte touchant la vue (Léonard, Paris, 1668).
Traité du nivellement (Cusson, Paris, 1672).
Essai de logique (Michallet, Paris, 1678).
Essais de physique (Michallet, Paris, 1679-1681).
Traité de la percussion ou choc des corps (Michallet, Paris, 1684).
Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides (Michallet, Paris, 1686).
Discours de la nature de l'air, de la végétation des plantes (Gauthier-Villars, Paris, 1923).

MARIOTTE (loi de)

C'est une des premières lois physiques représentées par une formule mathématique. Elle exprime qu'une masse de gaz occupe un volume V inversement proportionnel à la pression P qu'il subit, d'où la loi : PV = constante.
En fait, les gaz réels ne suivent la loi de Mariotte qu'approximativement et d'autant mieux que leur pression est faible. Le gaz parfait, abstraction commode, suit rigoureusement la loi de Mariotte, mais ce n'est qu'une abstraction permettant de simplifier les calculs ♦.

♦ La loi de Mariotte... a été découverte par Boyle, 30 ans avant Mariotte (qui l'ignorait). C'est donc à juste titre qu'elle est appelée loi de Boyle dans les pays anglo-saxons.

MASER ♦ pages 203, 204.

Abréviation de Molecular Amplifier by Stimulated Emission of Radiation.
On peut comparer un maser à un laser fonctionnant à des fréquences inférieures à celles des vibrations lumineuses. On retrouvera donc un système assurant l'inversion de population, c'est-à-dire faisant passer le plus possible d'électrons sur un niveau excité. Ce sera, par exemple, un champ électrique ou magnétique, ou encore une oscillation électromagnétique selon une méthode comparable au pompage optique. Le retour au niveau fondamental se fait sous l'action d'un signal radioélectrique qui se trouve, de ce fait, amplifié considérablement.
C'est ainsi que les signaux provenant de satellites, reçus par les antennes du centre de télécommunications spatiales de Pleumeur-Bodou (Côtes-du-Nord), sont amplifiés par un maser à rubis, fonctionnant dans l'hélium liquide, pour éviter que l'agitation thermique des électrons ne les fasse retomber spontanément sur le niveau fondamental. Dans ce type d'appareil, le pompage est assuré par un oscillateur à haute fréquence de 30 000 MHz ♦.
Une autre application des masers est la réalisation d'oscillateurs dont la fréquence est suffisamment bien déterminée pour servir d'étalons de fréquence. On utilise, dans ce cas, des masers à ammoniac ou à césium.

♦ Se reporter à Laser et à Pompage optique.

♦ Voir tableau des unités et symboles, page 13.

MASSE (Mass) pages 24, 28, 29, 31, 36, 56, 80, 84, 87, 99, 136, 141, 181, 182, 185, 196, 205, 208, 252, 254, 258, 263, 265, 266, 267, 274, 276, 282, 309, 316, 324, 325, 336, 337, 340, 346, 349, 350, 351, 355, 356, 358, 413, 414, 417, 420, 423, 426, 428, 429, 435, 436, 437, 439, 452, 479, 481, 482, 485, 494, 499, 507, 518, 528, 529.

Quantité de matière contenue dans un corps. L'effet le plus visible d'une masse est l'action sur celle-ci de l'attraction terrestre, autrement dit le poids. En un lieu donné, masse et poids sont proportionnels, ce qui explique la confusion, dans le langage courant, entre masse et poids, grandeurs de nature différente. Une masse s'exprimera en kilogrammes, un poids en newtons ou en kilogrammes-poids (1 kgp = 9,81 N). Un exemple fera comprendre la différence : un cosmonaute emporte 1 kg de nourriture. Sur la Terre, ce kilogramme pèse 9,81 ou environ 10 newtons. Sur la Lune, il pèsera environ 10/6 ou 1,7 newtons. Pendant une bonne partie du voyage, effectuée en état d'apesanteur, ce kilogramme de nourriture ne pèse rien. Mais sa valeur nutritive — et la quantité de matière correspondante — est restée constante. La masse est restée 1 kg. En fait, on sait, depuis Einstein, que la masse varie avec la vitesse ♦ ; ce qui caractérise un corps est donc sa masse au repos. Si un corps a une vitesse v, sa masse (masse relativiste) est donnée par :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$, c étant la vitesse de la lumière et m_0 la masse au repos.

♦ En réalité, il est plus correct de dire qu'un corps de masse m a une quantité de mouvement donnée, en mécanique classique, par $p = mv$ et, en mécanique relativiste, par $p = \frac{m\,v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$; c est donc l'expression de la quantité de mouvement plutôt que de la masse.

La correction n'est sensible que pour des particules données de vitesses très élevées, ce qui se produit dans les grands accélérateurs. On peut, conformément à la relation d'Einstein, considérer la masse comme une forme concentrée de l'énergie. La formule d'Einstein, $E = mc^2$, montre qu'une masse même infime correspond à une énergie énorme.

MASSE ATOMIQUE ou POIDS ATOMIQUE (Atomic mass)

pages 31, 33, 34, 45, 110, 111, 181, 258, 273, 313, 356, 478, 529.

Par l'étude des combinaisons chimiques, on a réussi à « peser » les atomes en prenant l'un d'entre eux comme unité : le carbone. On obtient ainsi le système des masses atomiques en affectant au carbone C le nombre 12. Avec la convention faite, la masse atomique d'un élément représente le nombre total de nucléons contenus dans le noyau de cet élément ; par exemple, le nombre de nucléons du carbone est 12 (6 protons + 6 neutrons). On obtient ainsi un système de nombres (voisins de nombres entiers) proportionnels aux masses des atomes réels.

L'atome-gramme, ou mole (molécule-gramme) d'atomes, est la masse (en grammes) qui s'exprime par un nombre égal à la masse atomique, ce qui représente un nombre d'environ $6{,}02.10^{23}$ atomes ♦ (nombre d'Avogadro).

♦ Soit 602 mille milliards de milliards !

MASSE CRITIQUE : voir Critique (masse)

MASSE MOLAIRE : voir Mole et la page 111.

MATÉRIALISATION (Materialization)

Passage d'énergie à l'état de matière. Plusieurs cas de matérialisation ont été observés :

— création d'électrons : photon gamma $\longrightarrow$ $e^- + e^+$;

— création d'une paire proton + antiproton par le choc d'un proton accéléré sur un proton cible : $p + p \longrightarrow p + p + \underbrace{p + \bar{p}}_{\text{paire créée}}$;

— création de mésons π ou K par choc de protons.

MATIÈRE (Matter)

pages 32, 85, 92, 134, 177, 182, 196, 204, 205, 208, 255, 279, 285, 324, 329, 336, 345, 349, 351, 355, 413, 445, 447, 456, 479, 482, 504, 514, 518, 537.

Notion très générale et difficile à définir. Est matière tout ce qui est doué de masse, et subit par conséquent l'interaction de gravitation (même si cette interaction est négligeable devant d'autres interactions...).

MAXWELL (James Clerk)

pages 83, 102, 135, 193, 197, 198, 201, 207, 257, 277, 289, 330, 360, 361 à 363, 417, 419, 446, 480.

James Clerk Maxwell (Viollet)

Physicien écossais, né à Edimbourg en 1831, mort à Cambridge en 1879.
Passionné de physique et de mathématiques, Maxwell enseigne quelque temps à Londres, puis prend la direction du célèbre laboratoire Cavendish de Cambridge. Élève de Faraday, il se consacre surtout à des recherches en électricité. Sa grande œuvre est la théorie électromagnétique de la lumière (1865), qu'il démontre à partir de l'identité de vitesse entre la lumière et la propagation d'un ébranlement

électromagnétique. Cette remarquable synthèse, qui exprime la convergence de toutes les branches de la physique, ouvre la porte à une nouvelle ère de cette science en même temps qu'elle en conclut une étape.
Cette découverte n'est toutefois pas l'unique effort de Maxwell en électricité. Il transcrit les lois de Faraday en langage mathématique, vérifie que le rapport des unités électriques dans les deux systèmes absolus est égal à la vitesse de la lumière, donne les équations générales du champ magnétique et découvre la magnétostriction.
Parfois aussi génial praticien que théoricien, il tire de ses expériences les principes de base de la photographie en couleurs et l'explication du radiomètre de Crookes. Par ailleurs, Maxwell contribue à l'élaboration de la théorie cinétique des gaz en étudiant la répartition des vitesses des molécules et, en mesurant le frottement interne des gaz, rend compte de diverses propriétés de ceux-ci en termes quantitatifs précis.

Le maxwell est une ancienne unité de flux magnétique, qui vaut 10^{-8} weber.

Ouvrages essentiels :
Traité d'électricité et de magnétisme (Gauthier-Villars, Paris, 1885-1887).
Theory of Heat (Longmans and Green, Londres, 1872).
The Scientific Papers (University Press, Cambridge, 1890).

MAXWELL (Équations de) : voir Électricité et magnétisme page 193.

MÉCANIQUE (Mechanics) pages 34, 35, 37, 38, 47, 87, 135, 147, 173, 176, 180, 183, 198, 201, 204, 209, 210, 211, 212, 235, 256, 261, 270, 271, 274, 276, 277, 291, 300, 304, 305, 311, 316, 319, 346, 358, 361, 410, 416, 417, 419, 422, 423, 428, 485, 497, 500, 501, 505, 508, 511, 525, 532.

Partie de la physique étudiant le mouvement des corps et les causes qui le créent ou le modifient, c'est-à-dire les forces. L'étude du mouvement lui-même est la cinématique, celle des forces constituant la dynamique. Le cas particulier important du mouvement nul fait l'objet de la statique.
Un mouvement ne pouvant être défini que relativement à des repères, il convient en premier lieu de déterminer ceux-ci. On utilise soit des repères terrestres (liés à la Terre), soit des repères « galiléens », liés à des astres fixes.

Mécanique classique et mécanique relativiste

La mécanique classique ou newtonienne est basée sur le caractère absolu du temps : le temps est le même pour un observateur lié à un repère fixe que pour un observateur lié à un repère en translation par rapport au premier : une minute a la même valeur pour le chef de gare et pour un voyageur du train défilant devant ce chef de gare. Cela nous paraît évident et, pourtant, l'expérience de Michelson a montré que le temps n'a pas cette valeur absolue. On arrive ainsi à la mécanique relativiste, dont Einstein est le fondateur, et qui ne fait plus du temps une grandeur immuable. L'étude des propriétés des rayons cosmiques a confirmé l'hypothèse de la relativité du temps : les mésons π (pions) ont une durée de vie telle qu'on ne devrait pas les observer sur la Terre ; or on en observe.
Leur durée de vie doit être mesurée non avec un temps terrestre, mais avec le temps d'un système de référence lié au méson, qui se déplace à une vitesse assez voisine de celle de la lumière. Il faut appliquer dans ce cas la transformation de Lorentz.
La mécanique classique reste valable, même aux vitesses largement supersoniques!

On ne doit faire appel à la mécanique relativiste que dans les cas de particules de vitesse élevée.

Mécanique quantique

C'est un autre aspect de la mécanique ; la mécanique quantique est appelée ainsi en raison du moment cinétique qui ne peut varier que par sauts, et non de façon continue. Autrement dit, une roue lancée en « roue libre » ne s'arrêtera pas par ralentissement continu, mais par « sauts quantiques ». Là encore, la mécanique classique est une approximation généralement suffisante : on ne se rend pas compte de l'arrêt de la roue par sauts quantiques... Mais ce n'est plus vrai à l'échelle des particules. Le saut quantique minimal est égal à $\frac{h}{2\pi}$ (h = constante de Planck = $6{,}62.10^{-34}$), négligeable à notre échelle, mais pas à celle de l'électron. La quantification de l'énergie est une conséquence de celle du moment cinétique. Elle explique l'existence de raies spectrales discontinues ; elle a également permis une description cohérente de l'atome et de son cortège électronique.

Mécanique ondulatoire

Imaginée par Louis de Broglie, la mécanique ondulatoire s'est révélée particulièrement féconde. Elle s'énonce ainsi : à tout corpuscule correspond une onde broglienne et, réciproquement, à toute onde se trouve associée une particule.
Si la mécanique des particules est à la fois quantique et ondulatoire, et perd du fait de l'introduction des relations d'incertitude de Heisenberg l'aspect rigoureux de la mécanique classique pour raisonner sur des probabilités, si elle renonce à décrire des trajectoires, elle permet de définir et de prévoir le comportement d'un système à partir de conditions initiales données. Remarquons que les termes « quantique » et « ondulatoire » appliqués aux particules sont pratiquement synonymes ; cela est dû à la nature même des particules.

MÉMOIRES (Memories) pages 203, 222, 245, 246, 260, 410, 510.

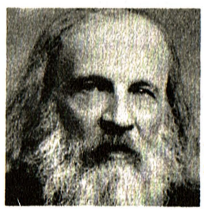
Dispositifs permettant de mettre en réserve des informations utilisables dans un ordinateur. Les mémoires les plus utilisées actuellement sont les mémoires magnétiques constituées par des anneaux de ferrite ♦ qui pourront s'aimanter ou se désaimanter, donnant ainsi les positions 0 et 1 du système binaire ♦.
Ces mémoires sont maintenant concurrencées par les mémoires sur films minces et sur fils ♦ ainsi que par les mémoires supraconductrices, où l'information est stockée sous forme de courant tournant indéfiniment dans un anneau supraconducteur plongé dans l'hélium liquide.

♦ Voir Ferrimagnétisme.
♦ Voir Calcul binaire.

♦ C'est-à-dire par un enregistrement sur bande magnétique ou fil magnétique.

MENDÉLÉIEV (Dmitri Ivanovitch) pages 40 à 45, 104, 113, 135.

Chimiste russe, né à Tobolsk en 1834, mort à Saint-Pétersbourg en 1907.
Chimiste de génie, Mendéléïev est surtout connu pour son tableau de classification des éléments chimiques. Celui-ci recevra une confirmation éclatante avec la découverte d'éléments nouveaux et le développement de la microphysique moderne. Professeur de chimie à l'université de Saint-Pétersbourg, Mendéléïev se montre très actif. Un séjour dans le Caucase et dans le Donetz le mène à formuler une théorie sur l'origine du pétrole et à étudier les gisements de charbon fossile. Sa grande découverte théorique est la loi périodique des éléments chimiques, qui porte son nom, et qui le mènera à élaborer son célèbre tableau ♦.
On lui doit en outre divers travaux sur l'isomorphisme, la compression des gaz,



Dmitri Ivanovitch Mendéléïev (Viollet)

♦ Voir pages 42 et 43.

les propriétés de l'air raréfié, la nature des solutions et la mise au point d'une poudre sans fumée.

Bibliographie :

Œuvres complètes (Académie des sciences, Léningrad, 1949) [en russe].
Principes de chimie (Tignol, Paris, 1897).

MENDÉLÉÏEV (Tableau de) : voir l'Atome, pages 42 et 43

MÉSONS ♦ (Mesons) pages 27, 28, 46, 85, 103, 256, 259, 272, 275, 294, 306, 313, 325, 337, 339, 349, 352, 355, 413, 414 à 443, 486, 490, 537, 538.

♦ Se reporter à la physique des hautes énergies : les Particules.

Particules élémentaires, de masse intermédiaire entre l'électron et le proton. Observés d'abord dans les rayons cosmiques, on les produit couramment dans les grands accélérateurs de particules. Tous les mésons ont en commun leur faible durée de vie et leur spin nul.

On distingue :
— les mésons π ou « pions », neutres ou chargés, de masse environ 270 fois celle de l'électron ;
— les mésons K ou « kaons », neutres ou chargés, de masse environ 970 fois celle de l'électron.
Le méson π semble être la particule de champ de l'interaction nucléaire forte. Il avait été prévu par Yukawa en 1935, mais ne fut observé qu'en 1947 dans le rayonnement cosmique, car il se désintègre en donnant un muon; cette particule, observée en 1938, fut prise pour responsable des interactions fortes.

MÉTAL (Metal) pages 157, 181, 204, 258, 269, 315, 324, 325, 344, 355, 453, 478, 482, 491, 493, 501, 505, 507, 516, 523, 528, 529.

Élément caractérisé par un certain nombre de propriétés :
— éclat particulier dû à ses propriétés réflectrices (éclat métallique) ;
— bonne conduction de la chaleur et de l'électricité. De plus, la structure cristalline est en général compacte et donne aux métaux des propriétés mécaniques intéressantes : ténacité, dureté, etc. ;
— chimiquement, un métal est un élément électropositif, c'est-à-dire donnant un ion positif.
Les caractères métallique ou non métallique n'ont rien d'absolu et il n'y a pas de frontière nette entre métaux et non-métaux. Les éléments au caractère métallique le plus accusé sont ceux de la partie inférieure gauche de la classification périodique ♦ et ce caractère décroît vers le haut et vers la droite.

♦ Voir tableau page 42.

MÉTALLOÏDE : voir Non-métaux

MICHELSON (Albert) pages 199, 279, 338, 380, 494, 534.

Physicien américain, né à Strelno (Pologne) en 1852, mort à Pasadena (Californie) en 1931.
Officier de marine, Michelson quitte à trente ans le service pour se consacrer entièrement à l'enseignement et à la recherche. Ses premiers travaux sont consacrés à la vitesse de la lumière et, en 1881, il invente l'interféromètre ♦ qui lui permet de la mesurer avec précision dans le but de mettre en évidence les conséquences du mouvement de la Terre. En collaboration avec Morley, il entreprend alors

♦ Voir Michelson et Morley (Expérience de)

une série d'expériences célèbres qui aboutissent toutes à un « échec ». Ce résultat négatif, longtemps inexpliqué, est à l'origine de la théorie de la relativité.
Travaillant au Bureau international des Poids et Mesures, Michelson évalue la dimension du mètre en longueurs d'onde lumineuse ♦. Il mesure, en outre, les marées de l'écorce terrestre et détermine pour la première fois le diamètre d'une étoile, Betelgeuse, et celui des satellites de Jupiter.
Il reçoit le prix Nobel de physique en 1907.

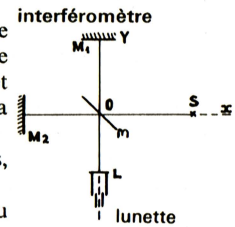
♦ Voir Unité.

Ouvrages essentiels :
Experimental Determination of the Velocity of Light (Bureau of Navigation, Washington, 1880).
Détermination expérimentale de la valeur du mètre en longueurs d'onde lumineuse (Gauthier-Villars, Paris, 1894).
Light Waves and their Uses (University of Chicago Press, Chicago, 1903).

MICHELSON ET MORLEY (Expérience de) (Michelson-Morley experiment) pages 197, 256, 494.

Cette expérience célèbre (1881) avait pour but d'étudier l'influence du mouvement de la Terre sur la vitesse de la lumière, et de confirmer — ou d'infirmer — l'existence de l' « éther », milieu hypothétique dans lequel se serait propagée la lumière. Pour un corps en translation dans l'éther, la vitesse de la lumière entre deux points ne devrait pas être la même que pour un corps au repos, de même que la vitesse d'un promeneur marchant sur un trottoir roulant se trouve augmentée de celle du trottoir.

Michelson avait réalisé l'appareil suivant :
Une source lumineuse S envoie un faisceau sur le miroir semi-argenté *m* qui le divise en deux : une partie suit le trajet OM_1 (après réflexion sur O), est renvoyée suivant M_1O et aboutit à la lunette L. L'autre partie traverse O sans se réfléchir et tombe sur M_2 qui la renvoie en O, où elle se réfléchit pour aboutir également à la lunette L.



On observe des interférences lumineuses dues à la différence des temps de parcours, par la lumière, des trajets OM_1O et OM_2O.
Si donc l'éther est le support des ondes lumineuses comme la surface de l'eau est le support de la houle, que doit-il se passer ? L'appareil étant mis en station de manière à ce que OM_2 soit parallèle à la direction de translation de la Terre, et OM_1 perpendiculaire à cette direction, on observe un certain aspect lumineux (franges d'interférence) dans la lunette qui correspond à la différence des temps de parcours de ces trajets t_1 pour OM_1O et t_2 pour OM_2O, soit $t_1 - t_2$.
Si on fait tourner le dispositif de 90°, dans l'hypothèse de l'éther, les temps de parcours doivent changer et devenir t'_1 et t'_2 pour tenir compte du fait que la vitesse de la Terre doit s'ajouter à la vitesse de la lumière, dans la branche de l'appareil parallèle à la translation de la Terre. La différence devient $t'_1 - t'_2$ et l'aspect de la figure d'interférences doit changer également.
Or, bien que l'appareil ait été conçu pour pouvoir apprécier les différences provenant de l'addition ou de la soustraction de 30 km/s (vitesse de translation de la Terre) aux 300 000 km/s (vitesse de la lumière), l'expérience s'est révélée négative. Il fallait donc admettre que la vitesse de la lumière était indépendante du repère choisi. Ce résultat, que Lorentz interprétait par une contraction des longueurs, a été à la base de la théorie de la relativité.

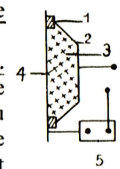
MICROANALYSEUR (à sonde électronique) (Microanalyser)

Dispositif inventé par Castaing (1955), qui permet de réaliser une analyse pratiquement ponctuelle des cristaux, puisqu'on peut déterminer la composition d'un cristal dont le volume est de l'ordre du micron cube $\left(\frac{1}{1\,000\,000\,000}\ \text{mm}^3\right)$.

Le principe est le suivant :
Un canon à électrons concentre sur l'échantillon étudié un faisceau d'électrons à grande vitesse, le diamètre du faisceau étant de l'ordre du micron. Ces électrons produisent, au cours de leur choc avec la matière, des rayons X.
L'analyse, par un ou plusieurs (on en utilise souvent 4) spectromètres, du rayonnement X émis permet d'obtenir des renseignements qualitatifs et quantitatifs sur l'échantillon étudié.
L'intérêt de la « sonde de Castaing » est de permettre de déceler des hétérogénéités dans les alliages, qu'on peut explorer point par point.
C'est un instrument précieux de la recherche métallurgique.

MICROPHONE (Microphone) page 486.

(Familièrement : micro.) Dispositif permettant la traduction d'une vibration sonore par un signal électrique (c'est donc un « transducteur »).
Le plus ancien est le microphone à grenaille de charbon imaginé par Edison. Une boîte contient de la grenaille de charbon ; elle est fermée par une membrane métallique qui vibre sous l'action des ondes sonores, en comprimant plus ou moins la masse de grenaille, dont la résistance électrique varie alors au rythme des vibrations. Si le système est relié à une pile, il circulera donc un courant variable, pouvant agir directement ou après amplification sur un écouteur ou un haut-parleur.
Il existe d'autres types de microphones (piézo-électriques, par exemple) dont le principe est voisin : dans tous les cas on fait varier une des caractéristiques (résistance, capacité) du circuit dans lequel est inséré le microphone, provoquant ainsi une variation du courant qui y circule.



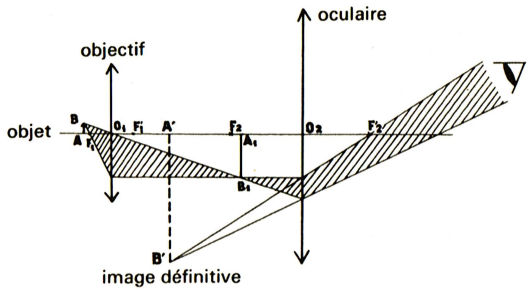
1 : isolant ;
2 : capsule métallique ;
3 : grenaille ;
4 : membrane vibrante métallique ;
5 : pile.

MICROSCOPE (Microscope) pages 91, 174, 211, 270, 324, 343, 348, 386.

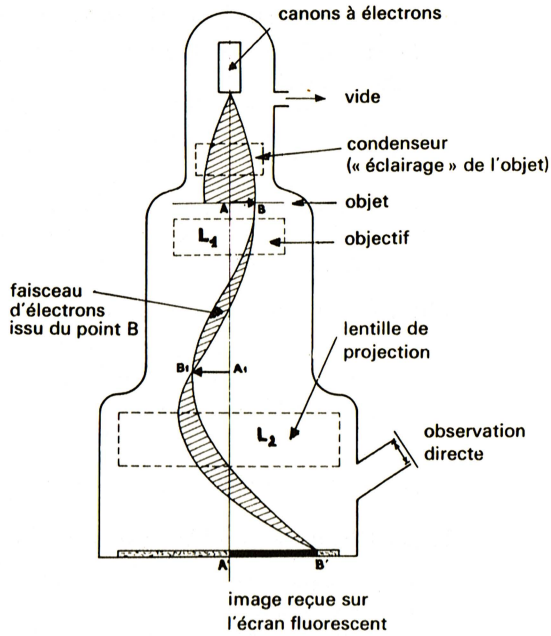
Dispositif permettant l'observation d'objets de petite taille et la perception de détails indiscernables à l'œil nu.
Un microscope comprend :
— un objectif, donnant de l'objet une image réelle agrandie ;
— un oculaire, permettant d'observer cette image, comme avec une loupe.
Les performances du microscope optique sont limitées par la nature même de la lumière. La diffraction ne permet pas de percevoir des détails de dimensions inférieures à une demi-longueur d'onde environ de la lumière utilisée. Cela limite le grossissement du microscope à environ 1 200. Un grossissement supérieur n'apporte aucun détail supplémentaire.
Si des artifices tels que le « contraste de phase ♦ » permettent d'observer des objets transparents (cellules vivantes, etc.), le grossissement est sensiblement le même. Pour augmenter le grossissement, il faut utiliser d'autres procédés, le microscope électronique, par exemple.

♦ Voir l'article : l'Optique, pages 390 à 393.

microscope optique



microscope électronique



MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE (Electron microscope)

pages 114, 174, 205, 325, 343, 345, 539.

Pour améliorer le pouvoir séparateur du microscope optique, on a remplacé la lumière visible par un faisceau d'électrons. L'intérêt réside dans le remplacement d'une longueur d'onde de 0,4 à 0,8 μ♦ par la longueur d'onde d'accompagnement ou onde associée de l'électron, suivant l'hypothèse de Louis de Broglie, et cette longueur d'onde est de l'ordre d'une fraction d'angström (Å). Si l'on passe de 0,6 μ, ou 6 000 Å, à 0,06 Å, le pouvoir séparateur sera théoriquement 100 000 fois plus grand. En fait, même si l'on n'atteint pas cette limite, les performances du microscope électronique sont intéressantes : on peut observer des détails de l'ordre de 1 Å et accéder à la vision directe de molécules ou de virus.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 14.

On retrouve dans le microscope électronique les mêmes éléments que dans le microscope optique.

Un faisceau d'électrons traverse l'objet AB, puis est repris par une lentille magnétique ou électrostatique L_1, qui le fait converger en A_1B_1 ; il passe ensuite dans le champ d'une autre lentille L_2 (jouant le rôle d'oculaire) qui en donne une image définitive A'B' sur un écran analogue à l'écran d'un téléviseur.

On ne peut observer que des objets suffisamment minces pour être traversés par des électrons, ce qui limite les possibilités de l'appareil, qui n'en demeure pas moins fort précieux.

MINKOWSKI (espace de) : pages 103, 198, 280, 330, 495.

MIROIR (Mirror) pages 268, 304, 431, 432, 480, 512.

Surface réfléchissante de métal ou de verre, renvoyant la lumière ou une onde électromagnétique.
On utilise des miroirs plans ou de formes plus compliquées : les télescopes utilisent des miroirs sphériques ou paraboliques, dont le rôle est analogue à celui d'une lentille ; ils donnent, d'un objet éloigné, une image en un point appelé foyer (cette expression prend tout son sens lorsqu'on pense aux miroirs utilisés dans les fours solaires ou aux miroirs ardents avec lesquels Archimède est dit avoir incendié la flotte romaine). On retrouve d'ailleurs ces miroirs paraboliques dans les antennes réceptrices des radiotélescopes ou des radars.

MODÉRATEUR (Moderator) pages 73, 74, 137, 181, 454, 491.

Substance utilisée dans un réacteur nucléaire pour ralentir les neutrons et rendre leur choc avec les matières fissiles plus efficace. Les modérateurs les plus utilisés sont l'eau lourde et le graphite. L'eau ordinaire est également utilisée (« piles-piscines »), mais elle a l'inconvénient d'absorber les neutrons, ce qu'on cherche à éviter dans la plupart des cas. On utilise aussi le béryllium et parfois l'oxygène (les modérateurs sont toujours des éléments de faible numéro atomique).

MODULATION ♦ (Modulation) pages 219, 224 à 228, 233, 240, 359, 403.

♦ Se reporter à l'article : l'Électronique, pages 224 à 228.

Superposition, à une vibration de fréquence constante appelée onde porteuse, d'un signal à transmettre.
Le problème concerne la téléphonie : la modulation permet plusieurs communications simultanées, portées chacune par des ondes de fréquences différentes, ainsi que les transmissions par radio où l'onde porteuse n'a plus de guide matériel. Deux moyens sont possibles : modulation en amplitude ou en fréquence.

Modulation en amplitude
C'est encore le procédé le plus courant. Dans ce cas, le signal provoque des variations d'amplitude de l'onde porteuse, la fréquence restant invariable.

Modulation de fréquence
Cette technique, plus complexe, donne des résultats intéressants dans le cas des fréquences élevées (de l'ordre du mégahertz : 10^6 Hz ♦).

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

L'amplitude de la porteuse reste invariable, mais sa fréquence varie au rythme du signal à transmettre : si on a à transmettre une note de musique comme le « la » du diapason (435 Hz), la porteuse subira 435 fois par seconde des variations de fréquence autour de sa valeur moyenne. L'importance de ces variations (l' « excursion » pour les techniciens) est proportionnelle à l'intensité du signal à transmettre. La modulation de fréquence est largement utilisée en télévision et en radio, car elle permet une reproduction fidèle du signal ; de plus, elle est relativement peu sensible aux parasites.

MOLE (Mole) pages 111, 258, 337, 531.

Appelée autrefois molécule-gramme, la mole est la quantité de matière contenant un nombre N de molécules identiques (N est le nombre d'Avogadro ♦). Par extension, on parlera :

♦ $N = 6{,}02.10^{23}$ (soit 602 mille milliards de milliards).

— d'une mole d'atomes, soit N atomes identiques (anciennement : atome-gramme) ;
— d'une mole d'ions ;
— d'une mole d'électrons (la quantité d'électricité portée par la mole d'électrons est appelée le faraday = 96 500 coulombs).

MOLÉCULE (Molecule)

pages 23, 32, 80, 104 à 133, 135, 149, 196, 201, 208, 253, 255, 259, 276, 306, 312, 320, 326, 327, 329, 332, 338, 343, 345, 348, 355, 409, 418, 421, 432, 460, 480, 481, 504, 507, 514, 530.

Classiquement, on définit la molécule comme un assemblage d'atomes de nombre et de nature quelconques, la propriété caractéristique de la molécule étant son indépendance vis-à-vis des molécules voisines. C'est donc un édifice atomique limité.

Ainsi définie, la molécule s'oppose aux édifices non limités tels que les cristaux atomiques ou ioniques.

Si les atomes de la molécule sont tous identiques, il s'agit d'un corps simple : molécule O—O ou O_2 de l'oxygène, S_8 du soufre (une molécule peut ne contenir qu'un seul atome [gaz rares : hélium, néon, etc.]).

Dans le cas contraire, on a affaire à des corps composés, comme l'eau H_2O ou l'ammoniac NH_3.

De même que l'atome est représenté par un symbole rappelant sa nature, la molécule est figurée par un assemblage de symboles rappelant le nombre et la nature des atomes la constituant : l'ammoniac a une molécule contenant un atome d'azote (N) et 3 atomes d'hydrogène (H_3).

Si la notion de molécule a mis près d'un siècle pour s'affirmer, sa réalité n'est plus mise en doute. La spectroscopie a permis de mesurer les dimensions des molécules et les distances interatomiques. On a même pu photographier au microscope électronique les plus grosses molécules.

MOMENT (Moment)

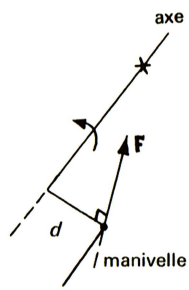
pages 28, 34, 35, 40, 45, 83, 145, 176, 191, 199, 201, 203, 260, 289, 305, 339, 354, 355, 356, 420, 445, 485, 497, 505, 508.

Beaucoup de grandeurs physiques portent le nom de « moment ». Dans ce cas, le « moment » n'est pas synonyme d'instant et n'introduit pas l'idée de temps ; par contre, tous les « moments » ont en commun l'idée de rotation.

Moment d'une force

La même force peut avoir des effets différents lorsqu'il s'agit de faire tourner un corps. Appliquée sur l'axe, son effet est nul. Il est d'autant plus grand que la distance de la droite d'action de la force à l'axe est grande. On appelle moment de la force le produit de cette force par sa distance à l'axe : $M = F.d$.

Sur la figure ci-contre, la force F appliquée à la poignée de la manivelle crée un moment Fd qui fait tourner le système. Appliquée sur l'axe, la même force a un moment nul et est incapable de produire la rotation.

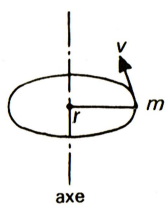


Moment cinétique ou moment angulaire

Si un point matériel en rotation a une vitesse $\vec{v}$, sa quantité de mouvement est $m\vec{v}$.

On appellera moment cinétique la quantité $\sigma = m\vec{v}\vec{r}$, r étant le rayon de sa trajectoire. C'est le cas d'un électron sur une trajectoire circulaire dans la théorie de Bohr.

L'hypothèse de base de la mécanique quantique est justement la quantification du moment cinétique, qui est un multiple entier de la quantité $\frac{h}{2\pi}$, h étant la constante de Planck.



moment cinétique

Moment d'inertie

On peut mettre σ sous la forme $\sigma = mr^2\omega$ où ω est la vitesse angulaire.
Pour un solide en rotation, tous les points ont la même vitesse angulaire. Le moment cinétique total est :

$$\sigma = \omega \times \underbrace{(\text{somme étendue à tous les points du solide des quantités } mr^2)}_{I}$$

$\sigma = I\omega$.

Par définition, I est le moment d'inertie du solide par rapport à l'axe de rotation. C'est une grandeur qui joue, dans la rotation, le rôle de la masse dans les mouvements de translation. Il est d'autant plus difficile d'accélérer la vitesse d'un solide soumis à une force de moment M que I est grand, comme il est d'autant plus difficile d'accélérer la translation d'une masse sous l'action d'une force que cette masse est grande.

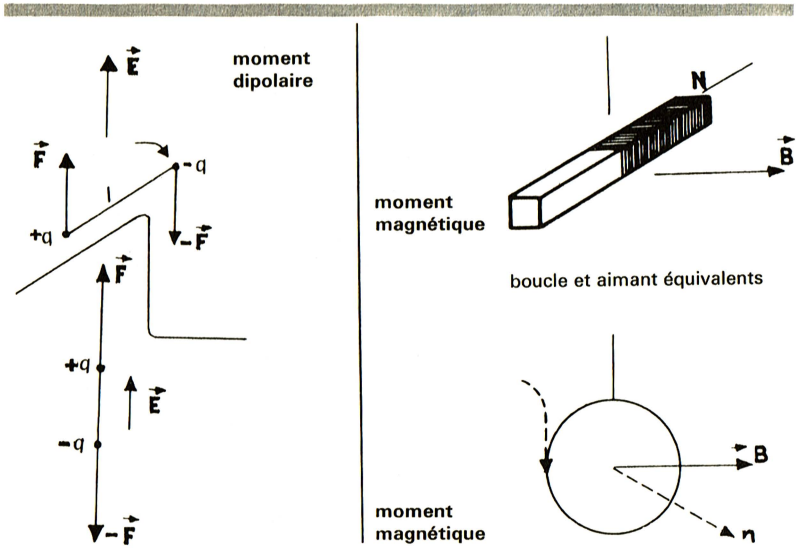
Moment dipolaire

On appelle ainsi la grandeur ql caractérisant le système de 2 charges électriques égales et de signe contraire à la distance l l'une de l'autre.
Placé dans un champ électrique uniforme E, ce système s'oriente d'autant mieux que la quantité ql est grande, et tend à se placer parallèlement au vecteur ♦ champ.

♦ Voir l'article : Aperçu mathématique, page 17.

Moment magnétique

De la même manière que précédemment, on constate qu'un aimant ou une boucle parcourue par un courant ont tendance à s'orienter dans un champ magnétique $\vec{B}$. On définit leur moment magnétique en écrivant que le moment des forces qui s'exercent sur l'aimant ou la boucle lui est proportionnel, toutes choses restant égales par ailleurs. Pour une boucle de surface S, parcourue par un courant I, le moment magnétique est égal au produit $m = SI$. Il s'exprime donc en $m^2 \times$ ampères. Par analogie, le moment magnétique d'un aimant exprimé avec la même unité est celui de la boucle qui, dans les mêmes conditions, subit les mêmes actions.



MONOCHROMATISME (Monochromatic radiation)

pages 323, 370, 484, 488, 506.

Une radiation lumineuse est caractérisée par sa longueur d'onde, à laquelle correspond la couleur de cette radiation.

La « couleur blanche » est définie par les artistes comme l'ensemble de toutes les couleurs. Pour le physicien, c'est l'ensemble de toutes les longueurs d'onde visibles. En effet, on peut décomposer la lumière blanche par un prisme et obtenir un spectre où les couleurs sont juxtaposées (l'opération inverse est possible et redonne la lumière blanche).

La lumière blanche est polychromatique. Au contraire, une partie du spectre, la plus étroite possible, donne une couleur unique et correspond à une radiation monochromatique.

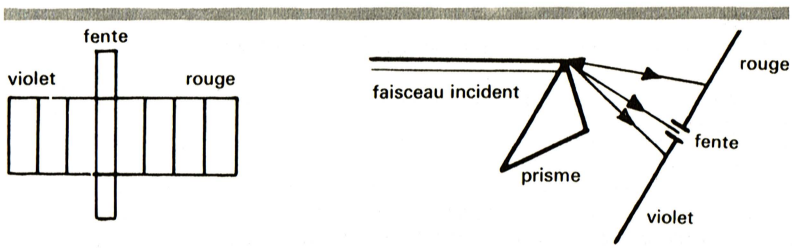
Finalement, une émission monochromatique est une émission ne comprenant que des radiations caractérisées par une même longueur d'onde. Cette définition est valable en dehors des domaines visibles, et on parlera de faisceau de rayons X monochromatiques, par exemple.

Pour obtenir un faisceau de lumière monochromatique, on prélève, dans un spectre, une bande étroite grâce à une fente placée dans le plan d'observation du spectre, ou, plus simplement, on utilise des filtres colorés absorbant toutes les radiations, à l'exception de celle que l'on cherche à obtenir (on utilise également des filtres où les radiations à éliminer le sont par interférences).

Certaines sources lumineuses sont naturellement monochromatiques. C'est, par exemple, le cas des lampes à vapeur de sodium éclairant certaines routes, donnant une lumière jaune sensiblement monochromatique.

Par extension, un faisceau d'électrons homocinétiques ♦ est dit monochromatique, puisque tous les électrons ont, selon la théorie de Louis de Broglie, la même longueur d'onde d'accompagnement.

♦ Faisceau homocinétique : faisceau dont toutes les particules ont la même vitesse.



MOSSBAUER (effet) (Mossbauer effect)

Effet de résonance découvert en 1958 par Mossbauer à Heidelberg. Il consiste dans l'absorption, par un cristal à la température de l'azote liquide, d'un rayonnement γ (gamma). Dans ces conditions, l'atome excité par une radiation ayant une certaine longueur d'onde réémet exactement la même radiation. On obtient ainsi, à partir d'un faisceau incident non monochromatique, un faisceau rigoureusement monochromatique : la longueur d'onde est définie avec un pourcentage d'écart de 1/100 000 000 000 (10^{-11}) et même 10^{-16}.

La qualité du rayonnement obtenu permet des expériences dont le but est de déceler des variations très faibles de longueur d'onde et de vérifier l'existence de l'interaction entre rayonnement électromagnétique et gravitation.

MOTEURS (Motors) pages 193, 252, 273, 307, 329, 358, 506, 515, 525.

Dispositifs très divers dont le but commun est de produire de l'énergie mécanique. Les premiers moteurs (roue à aubes, moulin à vent) ne font que rendre utilisable l'énergie mécanique de la chute d'eau ou du vent. Ce sont, en somme, des transformateurs d'énergie mécanique.
Les moteurs thermiques, dont l'ancêtre est la machine à vapeur, utilisent l'énergie thermique fournie par la combustion et en transforment une partie en énergie mécanique (on sait depuis Carnot que la transformation totale est impossible). Il faut inclure dans cette catégorie non seulement les moteurs à explosion, mais aussi les turbines à gaz et les « moteurs à réaction » du type turboréacteur ou fusée.
Les moteurs électriques produisent l'énergie mécanique à partir de l'énergie électrique produite par un générateur soit électrochimique (pile), soit électromécanique (alternateur, dynamo).

MOUVEMENT (Movement) pages 183, 196, 198, 205, 264, 266, 270, 276, 279, 305, 308, 334, 335, 338, 341, 352, 358, 409, 417, 428, 429, 456, 458, 462, 482, 494, 497, 520, 533.

État d'un corps ou d'un système qui s'oppose à celui de repos. L'état de repos est l'état d'un système dont tous les points occupent des positions fixes par rapport à des repères convenablement choisis. Si la position d'au moins un des points varie en fonction du temps, le système est en mouvement.
Nous voyons que la notion de mouvement est toute relative : le voyageur assis dans son fauteuil est au repos par rapport au train qui l'emporte. Mais il est en mouvement par rapport au sol.

Pour décrire un mouvement, il nous faudra donc :
— fixer un système de repères,
— étudier la trajectoire, c'est-à-dire l'ensemble des points occupés successivement par le « mobile »,
— étudier la loi du mouvement, c'est-à-dire la relation entre un point de la trajectoire et l'instant qui lui correspond.
Cette étude est le but de la cinématique ♦. ♦ Voir Mécanique.

Cas particuliers
— Si la trajectoire est une droite, le mouvement est rectiligne ; si, de plus, un point se déplace sur cette droite, à vitesse constante, le mouvement est uniforme ; dans le cas contraire, c'est un mouvement varié ;
— si la trajectoire est un cercle, le mouvement est circulaire. Lorsque la vitesse d'un point est constante sur cette trajectoire, nous aurons encore un mouvement uniforme.

MOUVEMENT BROWNIEN (Brownian movement) pages 88, 182, 447.

Agitation chaotique des molécules d'un gaz ou d'un liquide, observée par le biologiste anglais Brown. Les molécules ne sont pas visibles au microscope optique, si puissant soit-il. Mais, dans une suspension très diluée de particules (encre de Chine, par exemple), le choc des molécules sur les grains visibles leur donne un déplacement appréciable. C'est ce phénomène qu'on appelle mouvement brownien.

MUON (ou lepton mu) (Mu meson) pages 175, 260, 320, 326, 349, 351, 354, 440, 442, 490, 495, 514, 537.

Particule de la classe des leptons (comme l'électron). Découvert par Anderson en 1938 dans l'étude des rayons cosmiques, on pensa d'abord que le « méson μ » était la particule prévue par Yukawa. Pourtant, sa masse (200 m_e = 200 fois celle de l'électron) était trop élevée (Yukawa avait prévu 300 m_e), et sa durée de vie (2.10^{-6} s) 10 fois trop forte. Si l'on ajoute que son interaction avec la matière était faible, il ne pouvait s'agir du méson responsable de l'interaction forte.
Il fallut attendre 1947 pour observer la formation de muons à partir de mésons π :

$\pi \longrightarrow \mu + \nu$,
méson pi muon neutrino,
le muon se décomposant en un électron et 2 neutrinos :
$\mu \longrightarrow e + 2\,\nu$.

Caractéristiques générales d'un muon :
— existe sous 2 formes : μ^+ et μ^-, de masse 207 m_e ;
— vie moyenne : $2{,}2.10^{-6}$ seconde ;
— spin $\frac{1}{2}$;
— désintégration en $\mu^{\pm} \longrightarrow e^{\pm} + 2\,\nu$.

MUONIUM (Muonium)

Atome d'hydrogène dans lequel l'électron est remplacé par un muon. Il est donc formé de l'ensemble proton + muon. Cet édifice est aussi instable que le muon lui-même ; il a la même durée de vie.

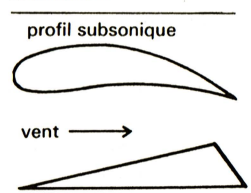
MUR DU SON (Sound wall) pages 25, 332, 441.

Passage d'un mobile avec une vitesse égale à celle du son dans le milieu où il se déplace.
Si on considère un point se déplaçant à une vitesse v, il provoque des ébranlements par compression de l'air, et ces ébranlements se propagent, eux, à la vitesse du son, V. Tant que v est inférieure à V, les ébranlements précèdent constamment le mobile ♦. Mais, si v = V, le mobile est au contact avec toutes les ondes sonores qu'il a émises. Il en résulte l'addition de toutes ces ondes sonores pour donner l'« onde de choc » et le phénomène sonore du « bang ». Le passage d'un aéronef dans le domaine sonique ♦ a posé des problèmes aujourd'hui résolus : les profils ♦ des ailes, utilisables en domaine subsonique, devenaient désastreux et les vibrations prenant naissance dans ce domaine critique ont provoqué de nombreux accidents. Actuellement, le mur du son est dépassé et les aéronefs atteignent couramment des vitesses de Mach 2 ou 3 (soit 2 ou 3 fois la vitesse du son).

♦ Voir Effet Doppler.

♦ Domaine sonique : domaine des vitesses voisines de la vitesse du son (Mach 0,7 à 1).

♦ Profil : coupe de l'aile par un plan parallèle à la direction de la vitesse.



NO

NÉEL (Louis) pages 26, 203, 260.

Physicien français, né à Lyon en 1904. Professeur à la faculté de Strasbourg puis à celle de Grenoble, directeur de plusieurs instituts et membre d'un grand nombre de sociétés, dont l'Académie des sciences, Néel fait une brillante carrière tant sur le plan officiel que sur celui de la recherche. Ce sont ses travaux sur le ferromagnétisme, le ferrimagnétisme et l'antiferromagnétisme qui lui permettent d'occuper une place importante en physique théorique et expérimentale et d'obtenir, en 1970, le prix Nobel de physique.

(Keystone)
Louis Néel

Ouvrages essentiels :

Influence des fluctuations du champ moléculaire sur les propriétés magnétiques des corps (Masson, Paris, 1932).

Propriétés magnétiques de l'état métallique et énergie d'interaction entre atomes magnétiques (Masson, Paris, 1936).

Extrait sur le moment et le champ moléculaire des ferromagnétiques (Masson, Paris, 1937).

Titres et travaux (Impr. de l'Allier, Grenoble, 1953).

NÉEL (Point de) : voir Ferrimagnétisme.

NEUTRINO (Neutrino) pages 46, 259, 326, 349, 354, 426 à 428, 431, 433, 434, 438, 439, 440, 445, 486.

Particule élémentaire, de masse nulle, électriquement neutre, de vitesse égale à celle de la lumière. Son spin est $\frac{1}{2}$.

Le neutrino a été imaginé par Pauli (1931), pour rendre compte de certains phénomènes accompagnant la radioactivité β^+ (bêta) : si l'on admet que le proton donne un neutron et un électron positif, suivant le schéma : ${}^{1}_{1}p \longrightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{1}e$, certaines lois de conservation ne sont pas satisfaites :

— l'énergie de l'électron émis devrait être constante, ce qui est contraire à l'expérience ;

— de plus, neutron, proton et électron ont des spins demi-entiers : dans ces conditions, le spin n'est pas conservé.

Toutes ces objections tombent si l'on admet l'émission d'une particule, le neutrino ν, de spin $\frac{1}{2}$ et qui emportera l'énergie qui manque au bilan.

On écrira donc : ${}^{1}_{1}p \longrightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{1}e + {}^{0}_{0}\nu$.

Le neutrino n'est pas facile à observer, car ses interactions avec la matière sont très rares ; on compte seulement quelques « événements » qui pourraient être attribués au neutrino. Comme à toute particule correspond une antiparticule, il existe naturellement un antineutrino, particule émise lors de la radioactivité β^- :

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

Les neutrinos sont émis lors d'autres réactions. Par exemple :

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu$$

méson pi muon neutrino, ou

$$\pi^+ \longrightarrow e^+ + \nu$$

méson pi positron neutrino.

On pense que les neutrinos correspondant à ces deux réactions sont différents et ne pourraient donner, ultérieurement, que des muons ou que des électrons.

NEUTRON ♦ (Neutron)

pages 32 à 79, 98, 115, 171, 173, 181, 203, 250, 256, 259, 260, 263, 275, 276, 284, 294, 305, 306, 312, 313, 325, 337, 344, 350, 354, 355, 356, 414 à 443, 457, 473, 474, 487, 488, 490, 491, 497, 499, 522, 529.

♦ Se reporter à l'article : la physique des hautes énergies : les Particules, pages 420 et 421.

Particule élémentaire, de charge électrique nulle et de masse environ 1 840 fois plus grande que celle de l'électron (donc très peu différente de celle du proton). Son spin est $\frac{1}{2}$ (il fait partie des fermions).

Découverte et production des neutrons

Le neutron a été découvert par sir James Chadwick ♦ en 1932. L'existence du neutron permettait d'interpréter l'émission d'un « rayonnement » neutre par des atomes de béryllium sous l'action de particules alpha, phénomène observé par Irène et Frédéric Joliot-Curie en 1930, et attribué par eux à des rayons gamma hautement énergétiques, réaction qu'on peut écrire :

♦ Sir James Chadwick : né à Manchester en 1891. Spécialiste de physique nucléaire, il étudia la charge des noyaux et leur désintégration par les particules alpha. Sa découverte du neutron en 1932 lui valut le prix Nobel en 1935.

$$^{9}_{4}\mathrm{Be} + ^{4}_{2}\alpha \longrightarrow ^{12}_{6}\mathrm{C} + ^{1}_{0}n$$

béryllium alpha carbone neutron.

On utilise également des deutons (noyaux d'hydrogène lourd, formés d'un neutron et d'un proton). Envoyés sur une cible, celle-ci capte les protons, et le neutron, qui n'est pas dévié, se retrouve seul.

Utilisation des neutrons

Les neutrons sont des projectiles de choix, car ils sont insensibles aux champs électriques créés par les particules cibles. Ils sont responsables des réactions de fission, d'où l'importance du problème posé par la production et le contrôle d'un flux de neutrons.

On utilise les neutrons dans une technique appelée « neutrongraphie », qui vient compléter la radiographie X ou gamma. Les éléments légers, transparents aux rayons X, sont absorbés par les neutrons ; une neutrongraphie permettra, par exemple, de distinguer une eau lourde d'une eau naturelle, ce que ne peuvent faire les rayons X.

Détection des neutrons

Elle ne peut se faire par les méthodes habituelles (chambre à bulles, chambre de Wilson, etc.) : ils ne sont pas ionisants et n'impressionnent pas la plaque photographique. On utilise des compteurs Geiger remplis de fluorure de bore, BF_3 : l'isotope 10 du bore réagit avec les neutrons pour donner des particules ionisantes qui agissent sur le compteur.

Le neutron est stable tant qu'il est inclus dans un noyau atomique. A l'extérieur du noyau, le neutron a une vie moyenne de 13 minutes et se décompose en un proton, un électron et un neutrino :

$$ {}_{0}^{1}n \longrightarrow {}_{1}^{1}p + {}_{-1}^{0}e + {}_{0}^{0}\nu. $$

On classe habituellement les neutrons d'après leur vitesse : les neutrons rapides, émis lors d'une fission, ont une énergie de l'ordre du million d'électrons-volts ; les neutrons lents, ralentis par les chocs avec d'autres noyaux, ont une énergie de l'ordre de l'électron-volt, ou moins ♦. Ce sont les plus efficaces.

♦ Se reporter à l'article : l'Atome, pages 69 à 71.

Actuellement, on tend à considérer le neutron comme l'un des trois aspects possibles d'une particule, le nucléon formant l'essentiel du noyau atomique ; les deux autres aspects du nucléon sont le proton et l'antiproton. Cela est d'autant plus plausible que les passages d'un état à un autre sont connus (radioactivité β^- et β^+) et que, d'autre part, il existe bien d'autres particules pouvant se présenter sous plusieurs états électriques (les mésons, par exemple).

NEWTON (Isaac) pages 35, 36, 184, 186, 193, 274, 280, 286, 305, 316, 331, 332, 338, 378, 417, 426, 494, 495, 523.

Physicien, mathématicien et astronome anglais, né à Woolsthorpe (Lincolnshire) en 1642, mort à Kensington (Middlesex) en 1727. L'une des plus grandes figures de la science, Newton pose les fondements et les méthodes de la science moderne. C'est probablement pendant sa jeunesse, lors de ses premières années au Trinity College de Cambridge et de sa retraite de deux ans dans sa ville natale, que Newton établit les bases de ses découvertes fondamentales. Si ses premières recherches le poussent dans le domaine des mathématiques, où il excellera toute sa vie, il se consacre également déjà à la physique : analyse de la composition de la lumière blanche ; découverte de la force de gravitation qui maintient la Lune sur son orbite. L'optique devient alors le principal centre d'intérêt de Newton. Il invente et exécute lui-même un télescope à miroir en 1671, ce qui lui vaut d'être nommé membre de la Royal Society. Reprenant et développant sa théorie sur la lumière blanche, il explique un grand nombre des phénomènes de couleur, dont l'arc-en-ciel, puis propose une théorie des irrisations produites par les lames minces, étudie le phénomène d'aberration chromatique. Se penchant sur les lois de la réflexion et de la réfraction, il énonce la relation existant entre le rayon d'un anneau brillant et la couleur de la lumière (phénomène des anneaux de Newton). Après de longues recherches sur la nature de la lumière, le physicien en avance une explication plus corpusculaire qu'ondulatoire, sans toutefois trancher complètement ce problème : la lumière serait faite d'une série de corpuscules émanant de corps lumineux et qui donnent naissance à des ondes en traversant l'éther.

Quant à l'œuvre de Newton en matière de gravitation et d'astronomie, elle est fondamentale. Dès sa jeunesse, il se penche sur le problème du mouvement. La célèbre anecdote de la pomme se serait passée vers 1666. Toutefois, ce n'est qu'en 1687 qu'il énonce sa théorie de l'attraction universelle : une seule et unique force de gravitation universelle fait tourner les planètes autour du Soleil selon des orbes elliptiques. De plus, cette force, qui décroît avec le carré de la distance, fait tourner la Lune autour de la Terre et tomber les objets sur la Terre ♦. Ce principe fondamental est publié dans les « Principes mathématiques de philosophie naturelle », où sont également développés les lois du choc, le mouvement des fluides, le calcul de la précession des équinoxes, la théorie des marées...

♦ N'oublions pas en effet que les vitesses des corps célestes sont suffisamment faibles pour que la mécanique newtonienne puisse leur être appliquée, sans tenir compte de la relativité (voir Mécanique).

Ouvrages essentiels :
La Chronologie des anciens royaumes (Martin, Paris, 1728).
Réponse aux observations sur la chronologie (Pissot, Paris, 1726).
La Méthode des fluxions, et les suites infinies (de Bure aîné, Paris, 1740).
Principes mathématiques de la philosophie naturelle (Desaint et Saillant, Paris, 1759).
Arithmétique universelle (Bernard, Paris, 1802).
Traité d'optique (Gauthier-Villars, Paris, 1955).
Œuvres complètes (Nichols, Londres, 1779-1785) [en latin].

NEWTON (N) pages 266, 269, 336, 444, 484.

Unité légale de force qui communique une accélération de 1 m/s² à une masse de 1 kg.

NIVEAUX D'ÉNERGIE♦ (Energy levels) pages 38, 140, 204, 209, 235, 251, 264, 321, 336, 420, 428, 449, 501, 522, 528, 538.

♦ Se reporter à l'article : l'Atome, pages 38 à 41, et à : Couches électroniques.

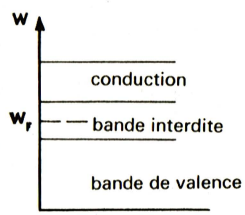
Ensemble des valeurs de l'énergie que peut avoir un électron, lié à un ou plusieurs atomes, conformément aux règles de quantification. Chaque niveau est caractérisé par un nombre, le nombre quantique principal n, pouvant prendre toutes les valeurs entières positives. Une autre terminologie consiste à prendre les majuscules à partir de la lettre K : $n = 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6$

K L M N O P, etc.

Les nombres n croissants correspondent à des électrons de plus en plus éloignés de l'atome. A chaque électron correspond un niveau fondamental, correspondant à l'énergie la plus faible, donc au système le plus stable. S'il se trouve sur un autre niveau, l'électron sera excité.

NIVEAU DE FERMI (Fermi level)

Au zéro absolu, les électrons occupent effectivement toutes les places prévues par les règles d'occupation des niveaux d'énergie. L'énergie correspondant à la dernière case quantique occupée porte le nom d'énergie de Fermi, ou niveau de Fermi, W_F, qui caractérise le corps étudié.



La position du niveau de Fermi par rapport aux bandes d'énergie possibles pour les électrons d'un cristal permet de prévoir le caractère isolant ou conducteur de ce cristal.
Ainsi, dans un semi-conducteur, le niveau de Fermi se trouve à peu près au milieu de la bande interdite. Il en résulte qu'au zéro absolu la conduction est nulle.
Lorsque la température s'élève, certains électrons peuvent avoir une énergie supérieure à W_F et se trouvent dans la bande de conduction ; le cristal est alors conducteur.

NIVEAUX ÉLECTRONIQUES : voir Couches électroniques

NOMBRE BARYONIQUE (Baryonic number) page 29, 103, 142, 306, 394, 413.

Nombre total de baryons contenus dans un système de particules, c'est-à-dire la somme des nombres de nucléons et d'hypérons, diminuée du nombre des antiparticules correspondantes.

Les interactions nucléaires conservent le nombre baryonique. Ainsi, la production d'un antiproton peut se schématiser de la façon suivante :

$$\underset{\text{proton}}{p} + \underset{\text{proton}}{p} \longrightarrow \underset{\text{protons}}{p + p + p} + \underset{\text{antiproton}}{\bar{p}}$$

(pourvu que les protons initiaux aient une énergie suffisante).
Cette réaction montre qu'on peut affecter au proton le nombre baryonique + 1, l'antiproton ayant un nombre baryonique — 1.

NOMBRE DE CHARGE : voir Numéro atomique

NOMBRE LEPTONIQUE (Leptonic number) pages 29, 326, 413.

Notion analogue au nombre baryonique : le nombre leptonique d'un système est égal au nombre de leptons (électrons, muon négatif, neutrino), diminué du nombre d'antileptons (positrons, muon +, antineutrino). Il semble que le nombre leptonique se conserve dans les interactions, bien que des recherches récentes concluent plutôt à la conservation séparée d'un nombre électronique et d'un nombre muonique.

NOMBRES MAGIQUES (Magic numbers) pages 56, 523.

Certains noyaux sont particulièrement stables. On a remarqué que ces noyaux sont ceux qui contiennent un nombre de protons ou de neutrons égal ou légèrement inférieur aux nombres magiques, qui sont : 2, 8, 20, 50, 82, 126.
Le nombre 126, qui correspond à un élément transuranien (l'uranium correspond à 92), donne lieu à une hypothèse qui suscite de nombreuses recherches : au-delà des éléments transuraniens connus, qui sont tous instables, il existerait des éléments beaucoup plus stables, précisément pour un nombre de charge de l'ordre de 126. L'hypothèse est séduisante, car ces éléments pourraient avoir des propriétés intéressantes.

NOMBRE DE MASSE♦ (Mass number) pages 45, 250.

♦ Se reporter à l'article : l'Atome, page 45.

Nombre total (généralement symbolisé par A) de nucléons (protons + neutrons) contenus dans un noyau. Le nombre de masse est proportionnel à la masse du noyau puisque proton et neutron ont des masses voisines.
On peut trouver des noyaux ayant même nombre de masse, mais différant par leur nombre de protons (ou numéro atomique). Ce sont des noyaux « isobares ».

NOMBRES QUANTIQUES♦ (Quantum numbers) pages 38, 48, 50, 110, 144, 250, 256, 292, 313, 353, 409, 505, 539.

♦ Se reporter à Éléments de transition, et à l'article : l'Atome, pages 38 à 41, 49 et 50.

Certaines grandeurs sont quantifiées, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent prendre que des valeurs discrètes (ou discontinues), multiples d'un « quantum », valeur minimale de cette grandeur. On pourra ainsi caractériser l'état d'un système ou d'une particule en prenant comme unité le quantum, par des nombres mesurant les grandeurs définissant le système ou la particule. Ce sont des nombres quantiques.
Prenons un exemple. L'état d'un électron lié à un atome est caractérisé par 4 nombres quantiques :
— n : nombre quantique principal, exprime que le moment cinétique de l'électron

est multiple entier de $\frac{h}{2\pi} = \hbar$ (« h barré »), h étant la constante de Planck.

— p : nombre quantique secondaire, exprime les valeurs que peut prendre le moment magnétique de l'électron, et peut prendre toutes les valeurs entières de 0 à $n - 1$.

— m : nombre quantique magnétique, quantifie les orientations possibles du moment magnétique. Il peut prendre les valeurs entières de $-m$ à $+m$ (y compris 0).

— s : nombre quantique de spin, quantifie les effets de rotation de l'électron sur lui-même. Il peut prendre les deux valeurs $+\frac{1}{2}$ et $-\frac{1}{2}$.

Les nombres quantiques ne sont pas indépendants ; pour une valeur de n :
l prend les valeurs entières de 0 à $n - 1$;
m prend les valeurs entières $-l \ldots 0 \ldots +l$;
s prend les valeurs $+\frac{1}{2}$ ou $-\frac{1}{2}$.
L'étude des particules élémentaires fait intervenir d'autres nombres quantiques, tels que la parité ou l'étrangeté, auxquels il est difficile d'associer une signification physique.

NON-MÉTAUX (Metalloids)

Éléments, autrefois appelés métalloïdes, qui ne présentent pas les caractères de l'état métallique. Ils n'ont pas l'éclat métallique ni les propriétés mécaniques (résistance à la traction, etc.) caractérisant un métal à l'état solide. Ils ont une médiocre conductibilité de la chaleur et de l'électricité.
Il faut reconnaître que cette classification est assez arbitraire. On peut y remédier en remarquant que les métaux sont des éléments électropositifs, c'est-à-dire aptes à donner des ions positifs. Les non-métaux seront caractérisés par la propriété inverse. Le caractère non métallique décroît, dans le tableau de la classification périodique ♦, lorsqu'on va de la droite vers la gauche et de haut en bas.

♦ Voir pages 42 et 43.

NOYAU (Nucleus) pages 32 à 79, 105, 143, 172, 208, 236, 250, 253, 263, 269, 270, 276, 283, 288, 313, 334, 352, 354, 356, 409, 413, 421, 423, 424, 425, 427, 432, 434, 437, 438, 442, 456, 473, 484, 487, 490, 497, 499, 501, 522.

Ensemble plus ou moins complexe de particules où se trouve concentrée, sous une très forte densité, la majeure partie de la masse — donc, de la matière — d'un atome.
Le noyau est constitué de protons et de neutrons, liés par les forces d'interaction nucléaire forte, plus intense, à courte distance, que les forces de répulsion dues aux charges des protons. Les mésons sont vraisemblablement les particules caractérisant le champ d'interaction forte.
Différents modèles ont été proposés pour expliquer la stabilité et la cohésion du noyau :
a) le modèle en couches, comparable au modèle de l'atome de Bohr ♦ ;
b) le modèle de la goutte liquide, comparant les protons et les neutrons aux molécules d'une goutte liquide.
Ces modèles permettent d'expliquer certains phénomènes intranucléaires, mais aucun ne donne entière satisfaction.

♦ Voir l'article : l'Atome, pages 35 à 40.

NUCLÉAIRE (Nuclear) pages 66 à 75, 183, 203, 250, 259, 263, 266, 270, 311, 324, 340, 359, 421 à 426, 428, 433, 439, 457, 458, 473 à 477, 492, 497, 498, 499, 501.

Caractérise ce qui a trait au noyau de l'atome (on emploie assez souvent, à tort, l'adjectif « atomique »). Par exemple, l'énergie nucléaire est l'énergie tirée du noyau par des réactions de fission ou de fusion ♦.

♦ Pour la fission, se reporter à l'article : l'Atome, pages 67 à 71 ; pour la fusion, se reporter à l'article : la Physique des plasmas, pages 473 à 477.

NUCLÉAIRE (énergie) : voir Énergie page 252 et les pages 181, 263, 311, 324, 428, 458, 509.

NUCLÉON♦ (Nucleon) pages 32 à 79, 81, 270, 272, 275, 306, 337, 352, 353, 354, 413, 414 à 443, 473, 488.

Proton et neutron, de masses voisines, sont considérés comme deux aspects d'une même particule, le nucléon. Cela se justifie par le fait que le neutron, bien que de charge globale nulle, a un moment magnétique différent de zéro, donc possède des charges électriques. L'aspect chargé (proton) ou l'aspect neutre (neutron) seraient dus à deux valeurs différentes d'une grandeur quantifiée, le spin isotopique. A chaque aspect du nucléon correspond une antiparticule : nous aurons donc des antiprotons et des antineutrons.

♦ Se reporter à l'article : la physique des hautes énergies : les Particules, pages 420 et 421.

NUCLIDE (Nuclides) page 48.

Mot employé parfois, de façon incorrecte, à la place d'élément.
Un élément est l'ensemble des noyaux possédant le même nombre Z de protons, mais un nombre différent de neutrons (isotopes). Chacun de ces noyaux est donc caractérisé par son nombre de protons et son nombre de neutrons. C'est à lui que s'applique le nom de nuclide, qui sera donc caractérisé par une valeur fixée de chacun des deux nombres de masse A et de charge Z.

NUMÉRO ATOMIQUE (Atomic number) pages 41, 109, 113, 250, 272, 305, 313, 344, 354, 478, 490, 507, 519, 522, 528.

Nombre de protons contenus dans un noyau. On le symbolise, en général, par la lettre Z. C'est ce nombre qui fixe aussi le nombre d'électrons que possède l'atome correspondant ; ainsi, l'atome de sodium $^{23}_{11}Na$ est caractérisé par un nombre de masse $A = 23$ et un numéro atomique $Z = 11$. Le noyau contient donc 11 protons, et le cortège électronique comprend 11 électrons.

ŒRSTED (Hans Christian) page 190.

Physicien et chimiste danois, né à Rudköbing en 1777, mort à Copenhague en 1851.
Après des études de pharmacie et un long séjour à l'étranger, Œrsted se fixe à Copenhague où il devient professeur de physique, conseiller d'État et directeur de l'École polytechnique.
C'est à Œrsted que l'on doit la découverte de l'électromagnétisme, en 1819. Après de nombreuses recherches et expériences tendant à prouver que les forces chimiques et magnétiques d'une part, la lumière d'autre part, ont des bases électriques communes, Œrsted réussit à faire sa célèbre expérience au cours d'une conférence : une aiguille aimantée est déviée au voisinage d'un courant électrique. Cette découverte eut immédiatement un retentissement considérable dans le monde de la science.
D'autre part, le savant danois étudie la compressibilité des liquides et des gaz,

(Viollet)
Hans Christian Œrsted

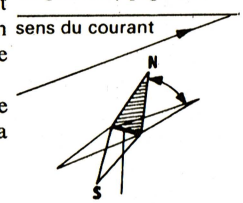
à l'aide d'un piézomètre qu'il construit lui-même, puis fait des recherches sur l'acoustique électrique et des observations sur le gaz sulfureux. Il est, enfin, le premier à isoler l'aluminium sous forme pulvérulente.

Ouvrages essentiels :
Recherche sur l'identité des forces chimiques et électriques (Dentu, Paris, 1813).
L'Esprit dans la nature (A. Schnée, Bruxelles, 1861).

ŒRSTED (Expérience d')♦ (Œrsted experiment) pages 101, 205.

♦ Se reporter à l'article : Électricité et magnétisme, page 190.

Cette expérience célèbre (1828) est la base de l'électromagnétisme : Œrsted fut le premier à constater qu'une aiguille aimantée était déviée au voisinage d'un fil parcouru par un courant électrique, qui se montrait ainsi capable de produire les mêmes effets qu'un aimant.
L'aiguille aimantée est déviée de telle façon qu'un observateur, couché sur le fil et parcouru par le courant des pieds à la tête, voit le pôle Nord dévier vers sa gauche (règle d'Ampère).



ŒRSTED

Unité d'induction magnétique, qui vaut 10^{-4} $\left(\text{ou } \frac{1}{10\,000}\right)$ de l'unité légale, le tesla (l'induction magnétique terrestre vaut 0,4 œrsted environ).

OHM (Georg-Simon)

Physicien allemand, né à Erlangen en 1789, mort à Munich en 1854.
De serrurier, Ohm devient professeur de mathématiques et de physique dans un collège de Cologne, puis à l'université de Munich en 1849. On lui doit la loi fondamentale des courants électriques, qui porte son nom.
En 1827, il précise la notion de force électromotrice et, la distinguant de celle d'intensité, il établit entre elles une relation où il introduit la valeur de la résistance du conducteur. Il définit alors la conductibilité d'un corps par la résistance d'un fil de longueur et de section données. Cette découverte exercera une grande influence sur le développement de la théorie et des applications des courants électriques.

L'œuvre d'Ohm est toutefois beaucoup plus étendue : il signale le phénomène de polarisation dans les piles, étudie les vibrations sinusoïdales, donne une théorie de la sirène et analyse l'interférence des rayons lumineux polarisés dans les lames cristallines.

Ouvrages essentiels :
Théorie mathématique des courants électriques (Hachette, Paris, 1860).
Elemente der analytischen Geometrie im Raume am schiefwinkligen Coordinatensysteme (Schrag, Nürnberg, 1849).

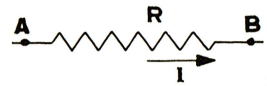
OHM pages 308, 316, 358, 496.

Unité légale de résistance électrique. C'est la résistance d'un conducteur entre les extrémités duquel on observe une différence de potentiel de 1 volt lorsque le courant qui le parcourt est de 1 ampère.

OHM (loi d') (Ohm's law) pages 157, 186, 189.

Loi permettant de calculer la différence de potentiel entre les extrémités d'une portion de circuit électrique.

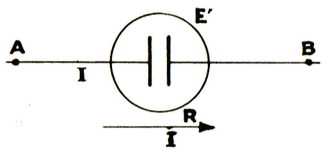
— *Cas d'une résistance « morte »* (fil métallique, par exemple, et, plus généralement, portion de circuit ne comprenant ni générateur ni récepteur) : $V_A - V_B = RI$, où $V_A - V_B$ est la différence de potentiel exprimée (en volts) entre A et B, A étant la borne d'entrée du courant, R, la résistance (en ohms), I, l'intensité du courant (en ampères).



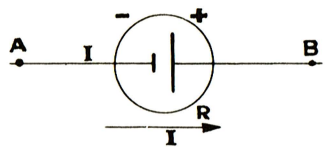
résistance morte

— *Cas d'un récepteur* (cuve à électrolyse, moteur, etc.). Le récepteur a une résistance intérieure R et une force contre-électromotrice E'. Dans ce cas :
$V_A - V_B = RI + E'$.

— *Cas d'un générateur* (pile, batterie, dynamo...). Le générateur a une force électromotrice E et une résistance intérieure R. Dans ce cas, $V_A - V_B = RI - E$. On remarquera qu'avec les notations la borne B est à un potentiel V_B supérieur au potentiel V_A de la borne A ; $V_B - V_A$ est positif, donc $V_A - V_B$ est négatif.



récepteur (cuve à électrolyse, moteur, etc.)



générateur (pile, batterie, dynamo...)

ONDE ASSOCIÉE pages 171, 322.

Par analogie avec la lumière, vibration de longueur d'onde λ à laquelle on associe un photon, grain d'énergie $W = \frac{hc}{\lambda}$ ♦, et une « masse » m définie par $W = mc^2$ (relation d'Einstein), Louis de Broglie a eu l'idée d'associer à une particule en mouvement une vibration de longueur d'onde λ qu'on peut déterminer ainsi : l'énergie du photon peut s'écrire $W = mc^2 = \frac{hc}{\lambda}$, d'où $\lambda = \frac{h}{mc}$. De même la particule de vitesse v a une longueur d'onde associée $\lambda = \frac{h}{mv}$.

♦ h est la constante de Planck, c'est la célérité.

L'expression mv est la « quantité de mouvement » de la particule. « Le corpuscule apparaît comme une sorte d'accident incorporé à la structrure d'une onde et guidé par sa propagation ♦ ». Cette hypothèse de base, confirmée par les expériences de Davisson et Germer sur la diffraction des électrons (1927), est à la base de toute la mécanique ondulatoire.

♦ L. de Broglie : *la Science contemporaine*.

ONDES HERTZIENNES (Hertzian waves)

Au même titre que la lumière ou les rayons X, les ondes hertziennes sont des radiations électromagnétiques, leur nom vient de Hertz, qui découvrit leur propagation dans l'atmosphère. Comme toute radiation électromagnétique, elles sont caractérisées par leur longueur d'onde ou leur fréquence, ce qui est équivalent.
Les ondes hertziennes sont à la base des télécommunications sans fil et on utilise différents domaines de longueur d'onde, qu'on peut classer comme suit :
Les ondes kilométriques, de longueur d'onde de 1 à 30 km, donc de fréquences

inférieures à 300 kHz, sont utilisées pour la radiotélégraphie et les aides à la navigation♦. Dans la bande de 1 à 2 km (fréquences de 150 à 300 kHz), on trouve les émetteurs de radiodiffusion en « grandes ondes » : Allouis, B.B.C., Europe 1, Luxembourg, etc.

♦ Se reporter à l'article : l'Électronique, pages 248 et 249.

Les ondes hectométriques, de longueur d'onde de 0,1 à 1 km (fréquences de 300 à 3 000 kHz), utilisées aussi pour des aides à la navigation et comprenant la bande — très fréquentée — des « ondes moyennes » ou « petites ondes » (600 à 200 m ou 500 à 1 500 kHz).

Les ondes décamétriques, de longueur d'onde de 10 à 100 m (fréquences de 3 000 kHz à 30 MHz = 30 000 kHz), utilisées en radiotéléphonie♦ et aussi en radiodiffusion (ondes courtes, sur diverses bandes comprises entre 50 et 11 m de longueur d'onde). Les ondes réfléchies sur l'ionosphère ♦ permettent, avec des puissances très faibles, des communications à longue distance.

♦ Radiotéléphonie ou liaison téléphonique sans fil.

♦ Ionosphère : couche fortement ionisée de la haute atmosphère (voir l'article : la Physique des plasmas, pages 460 et 463).

Les ondes métriques, de longueur d'onde de 1 à 10 m (fréquences de 30 MHz à 300 MHz), ont de nombreux utilisateurs : télévision, émission de modulation de fréquence, liaisons radiotéléphoniques aéronautiques et à terre, aides à la navigation, etc.

Les ondes décimétriques ou centimétriques, de longueur d'onde de 1 à 100 cm (fréquences de 300 à 30 000 MHz), ont des applications de plus en plus nombreuses: communications spatiales, faisceaux hertziens de communication, radioguidage d'engins, etc.

ONDULATOIRE : pages 143, 174, 176, 197, 206, 217, 267, 268, 276, 290, 305, 339, 352, 417, 500, 547.

ONNES (Kammerling) : pages 160, 167, 328, 412, 509.

OPPENHEIMER (J. Robert)

Physicien américain, né à New York en 1904, mort à Princeton en 1970.

Professeur de physique à l'université de Californie et au California Institute of Technology, Oppenheimer est nommé directeur du laboratoire de Los Alamos pendant la Seconde Guerre mondiale. Président de la Commission consultative sur l'énergie atomique, il est relevé de cette fonction en 1954 — ce qui entraîne divers remous dans les milieux scientifiques — mais continue à diriger l'Institut de Princeton.

(Viollet)

J. Robert Oppenheimer

Auteur de nombreux travaux en physique atomique, Oppenheimer a le don de grouper autour de lui et de diriger des étudiants aussi bien que des savants de valeur. La plupart de ses recherches portent sur la théorie quantique de l'atome. sur la théorie des rayons cosmiques et sur celle de la structure nucléaire. Lors de ses fonctions à Los Alamos, il contribue à l'élaboration de la première bombe à uranium.

Ouvrages essentiels:

L'Esprit libéral (Gallimard, Paris, 1957).

La Science et le bon sens (Gallimard, Paris, 1963).

The Flying Trapeze, three Crises for Physicists (Oxford University Press, Londres et New York, 1964).

OPTIQUE : voir l'article pages suivantes et les pages 109, 161, 171, 172, 173, 206, 258, 261 à 263, 264, 268, 270, 271, 304, 323, 325, 328, 332, 352, 449, 450, 496, 512, 527, 537, 538, 539.

L'optique

par Jacques Lafait

Notre but, dans cet exposé, est de montrer que l'optique est actuellement une science en plein essor. Le laser, les couches minces, le contraste de phase ont, en quelques dizaines d'années, apporté une véritable révolution dans cette branche de la physique apparemment totalement explorée.
Il serait donc vain de vouloir brosser en quelques pages un panorama complet de l'optique. Nous nous sommes borné à présenter des applications, parmi les plus récentes, de l'optique moderne et les connaissances de base nécessaires pour les comprendre.
Nous avons été obligé de passer sous silence trois domaines importants : l'optique physiologique, l'optique géométrique et la spectroscopie.

Jacques Lafait (né en 1944) : a suivi les cours de l'École supérieure d'optique, d'où il est sorti, ingénieur, en 1967. Licencié ès sciences physiques. Actuellement attaché de recherches au C.N.R.S. Il prépare une thèse de doctorat, à l'Institut d'optique, sur la mesure des constantes optiques des couches minces dans l'infrarouge.

QU'EST-CE QUE LA LUMIÈRE ?

Question que l'homme se pose depuis la plus haute antiquité et qui n'a trouvé de solution qu'au début du XXe siècle. Nous entendons par « solution » : théorie cohérente qui explique les phénomènes physiques d'une manière satisfaisante dans l'état actuel de nos connaissances ♦.

♦ V. Ronchi : *Histoire de la lumière* (A. Colin, Paris, 1956).

D'Épicure à nos jours : l'affrontement, la dualité, la synthèse

Depuis Épicure et Aristote, deux théories se sont affrontées : la lumière est-elle due à un flux de particules ou à la propagation d'une onde ? Sautons par-dessus les querelles philosophiques autour de ce dilemme et arrivons en 1865, année où Maxwell attribue à la lumière les propriétés d'un rayonnement électromagnétique. La théorie de Maxwell explique parfaitement et d'une manière simple la majorité des phénomènes optiques : interférences, diffraction, polarisation de la lumière, mais elle est impuissante à rendre compte

des interactions entre lumière et matière, notamment l'émission du corps noir et l'effet photoélectrique.
Vers le début du siècle, un physicien allemand, Max Planck, émet une hypothèse révolutionnaire : les échanges d'énergie entre la matière et le rayonnement, c'est-à-dire l'absorption et l'émission de lumière par la matière, ne se font pas d'une manière continue, mais par grain ou quantum d'énergie. A partir de cette hypothèse, Einstein, en 1905, explique l'effet photoélectrique et donne le nom de photons à ces « grains de lumière ». Jusque vers 1930, deux théories de la lumière, apparemment incompatibles et expliquant chacune certaines classes de phénomènes, sont donc à nouveau en présence : d'une part, la théorie corpusculaire, pour laquelle la lumière est un flux de particules élémentaires ou photons ; de l'autre, la théorie électromagnétique, qui considère la lumière comme une onde électromagnétique.
En 1924, Louis de Broglie introduit, pour l'électron, une dualité analogue. Pour rendre compte de ses propriétés, il faut tantôt le considérer comme une particule électrisée, tantôt lui associer une onde. Rapidement, la dualité onde/corpuscule s'étend aux autres particules élémentaires ; elle s'impose enfin comme une propriété générale de la matière.

Se servant de l'hypothèse de Max Born (1927), Heisenberg, Schrödinger et Dirac bâtissent alors une nouvelle mécanique, dite mécanique ondulatoire. Les problèmes, posés en terme de points ou de trajectoires de particules dans la mécanique classique, deviennent des problèmes de propagation d'ondes. Les aspects corpusculaire et ondulatoire ne sont plus contradictoires, mais complémentaires.
Se servant des méthodes utilisées pour passer de la mécanique classique à la mécanique ondulatoire, Dirac obtient, vers 1930, une nouvelle équation du champ électromagnétique de la théorie de Maxwell. Les solutions de cette équation sont des ondes quantifiées correspondant aux photons de la théorie de Planck. Ainsi la synthèse est réalisée.
Un exposé correct de l'optique devrait se baser sur cette théorie unifiée, mais cela suppose des développements mathématiques très complexes et les conclusions ne diffèrent pas de celles obtenues à l'aide de la théorie électromagnétique de Maxwell, du moins pour les phénomènes principaux de l'optique qui nous intéressent ici. C'est donc cette seconde voie que nous suivrons au cours de notre exposé.

La théorie électromagnétique de la lumière

Maxwell, dans sa théorie, prouve l'existence d'ondes électromagnétiques se propageant dans le vide à la vitesse de la lumière. D'où

fig. 1

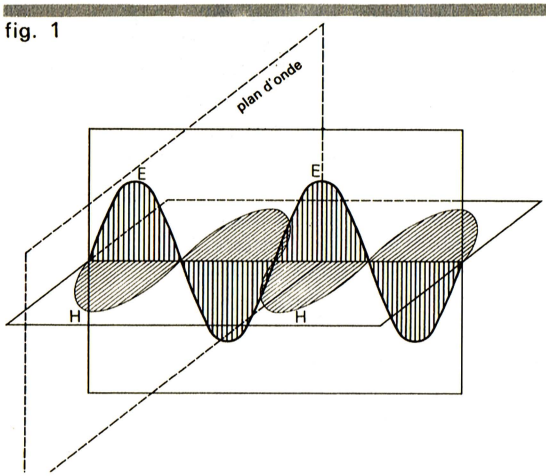
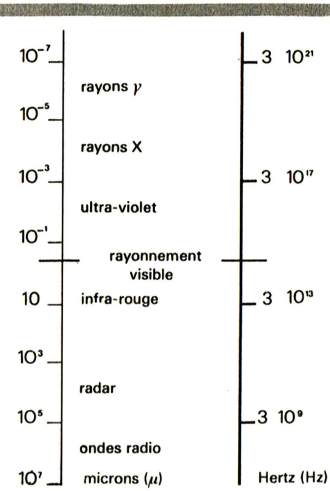


fig. 2



son intuition géniale d'assimiler la lumière à la propagation d'un rayonnement électromagnétique, intuition qui s'est trouvée vérifiée par de nombreuses expériences.

La lumière résulte donc de la propagation de deux champs : le champ électrique E et le champ magnétique H perpendiculaires entre eux et situés dans le plan d'onde (fig. 1). Ces deux champs étant en phase et ayant leurs amplitudes proportionnelles, on convient de caractériser le phénomène lumineux par l'un d'entre eux, le champ électrique E, le seul auquel l'œil et tous les photorécepteurs sont sensibles.

L'amplitude de E est variable, sa variation est sinusoïdale. Sa fréquence de vibration ν est directement liée à la longueur d'onde λ du rayonnement par cette constante universelle qu'est la vitesse de la lumière c : $\nu = \frac{c}{\lambda}$. Plus la longueur d'onde est petite, plus la fréquence est élevée. Une onde plane monochromatique sera donc caractérisée, dans le vide, par :

— sa direction de propagation perpendiculaire au plan d'onde contenant les vecteurs E et H,

— son énergie, proportionnelle au carré de l'amplitude du champ électrique E,

— sa longueur d'onde dans le vide λ.

L'optique ne se réduit pas à l'étude du spectre visible

Dans le vaste ensemble des radiations électromagnétiques, la lumière visible occupe un minuscule domaine (fig. 2), s'étendant de 0,35 à 0,75 micron ♦ en longueur d'onde ou encore de $7{,}5.10^{14}$ à $4{,}3.10^{14}$ hertz (soit 0,75 à 0,43 million de milliards de périodes par seconde) en fréquence.

♦ Un micron (1 μ) = un millième de millimètre (10^{-3} mm), un millionième de mètre (10^{-6} m).

Tout cela est bien théorique et ne semble pas relié à ce que notre œil peut voir d'une radiation lumineuse ! A quoi l'œil est-il sensible? Aux trois caractéristiques fondamentales de l'onde lumineuse :
— à sa direction de propagation ;
— à son énergie, qui caractérise l'intensité du phénomène lumineux, c'est-à-dire la valeur de l'éclairement produit sur la rétine de l'œil, donc finalement l'importance de la sensation lumineuse ;
— à sa longueur d'onde qui, dans le domaine visible, est directement associée, par l'intermédiaire du cerveau, à la notion de couleur. Ainsi, lorsqu'un arbre paraît vert, c'est qu'il réfléchit sélectivement, parmi toutes les radiations de la lumière visible (de 0,35 à 0,75 micron), la radiation de longueur d'onde 0,557 micron. Le phénomène est en réalité plus complexe, car on n'observe jamais une radiation purement monochromatique (ayant une longueur d'onde bien définie), mais un mélange de radiations de longueurs d'onde différentes centrées sur la dominante observée.
L'optique ne s'intéresse pas seulement à la partie visible du rayonnement électromagnétique, mais aussi, dans les longueurs d'onde plus élevées, à l'infrarouge, dans les longueurs d'onde plus basses, à l'ultraviolet, aux rayons X et aux rayons gamma (γ) ♦.
La lumière solaire comprend toutes ces radiations électromagnétiques dont, naturellement, celles du spectre visible.

♦ Voir fig. 2.

Relation avec la théorie quantique

A une onde électromagnétique, Planck avait associé des photons porteurs d'un quantum d'énergie w. Cette énergie est liée à la longueur d'onde λ, donc à la fréquence ν de l'onde par la constante de Planck h : $w = h\nu$. Les « photons ultraviolets » porteront une énergie plus grande que les « photons infrarouges ».

Vitesse de la lumière

Comme l'a laissé pressentir le fait que toute onde électromagnétique se propage dans le vide à la vitesse de la lumière, ce petit symbole c joue un très grand rôle dans toute la physique. Il intervient notamment dans les formules de correspondance entre grandeurs électriques, magnétiques et énergétiques. De la précision avec laquelle nous connaîtrons c dépendra l'exactitude de la détermination de ces grandeurs physiques.

D'une évaluation qualitative à une mesure précise de la vitesse de la lumière

La première mesure ♦ fut faite par Galilée qui essaya d'évaluer le temps mis pour échanger des signaux lumineux entre deux points très éloignés. La durée de propagation était très inférieure au temps de réaction des expérimentateurs, d'où une première approximation.

♦ Sur les diverses mesures de c, voir : P. Fleury et J.-P. Mathieu : *Lumière* (Eyrolles, Paris, 1961).

Parmi les dernières mesures faites au XXe siècle, citons celle de Bergstrand (1951) : un rayon lumineux est interrompu un grand nombre de fois par seconde par un dispositif électro-optique (cellule de Kerr). La lumière ainsi hachée est réfléchie, à très grande distance, par un miroir et revient sur la cellule. Si, à ce moment, la cellule est opaque, c'est qu'il s'est écoulé un multiple d'une demi-période (en pratique, juste une demi-période) du cycle ouverture-fermeture. Connaissant la distance parcourue par la lumière et la période ouverture-fermeture qui est celle du champ électrique alternatif ♦ appliqué à la cellule, on peut déterminer avec une grande précision la vitesse de la lumière. Le résultat actuellement admis est de 299 792,5 km par seconde, avec une marge d'incertitude de 0,1 km/s.

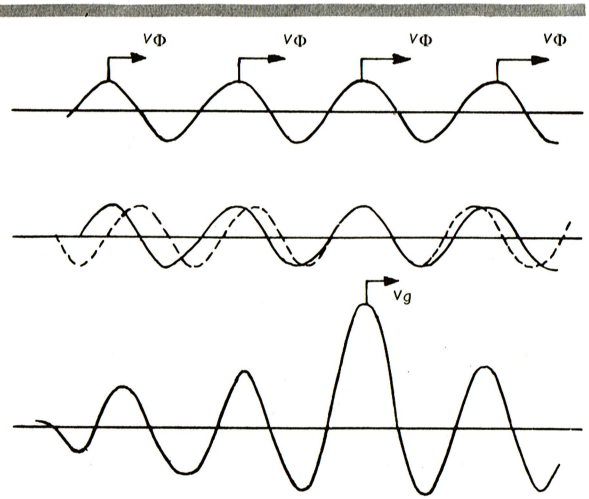
♦ Voir Courant.

Indice ♦

♦ La mesure des indices relève de la réfractométrie. Voir à ce sujet l'ouvrage de P. Fleury et J.-P. Mathieu : *Lumière* (Eyrolles, Paris, 1961).

Nous n'avons parlé jusqu'ici que de la vitesse de propagation c dans le vide (la mesure précédente était réalisée dans un vide partiel). Dans un milieu matériel (air, eau, verre...), la vitesse de propagation v est différente de c. Le rapport $n = \frac{c}{v}$ ou indice absolu est caractéristique du milieu considéré pour une radiation donnée — l'indice n et la vitesse v étant fonction de la longueur d'onde.
Dans le domaine visible, l'indice n de l'eau est de l'ordre de 1,33, celui des verres courants de 1,5. Dans le domaine des rayons X, l'indice de certains matériaux peut devenir inférieur à 1.
La vitesse v de propagation des rayons X dans ces matériaux est donc supérieure à la vitesse c de la lumière ! Or c est un absolu qu'on ne peut dépasser.

fig. 2-a



La vitesse $v = \frac{c}{n}$ dont on parle est une vitesse de phase. Elle correspond à la propagation d'une onde purement sinusoïdale, donc de fréquence unique, c'est-à-dire à une radiation purement monochromatique. Une telle onde n'existe pas. Seule une onde complexe, somme d'ondes purement sinusoïdales de fréquences voisines, est porteuse d'énergie. C'est le passage des fortes densités d'énergie que l'on mesure pour déterminer la vitesse de propagation du signal lumineux.
Or l'énergie est proportionnelle au carré de l'amplitude de la vibration. Les maximums d'amplitude de l'onde complexe sont beaucoup plus écartés que ceux de l'onde pure. La vitesse mesurée, appelée vitesse de groupe (v_g), est alors bien inférieure à la vitesse de phase (v_Φ) et, dans tous les cas, inférieure à la vitesse de la lumière.

RÉFLEXION ET RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE

Les ondulations

Réalisons l'expérience simple suivante : nous montons sur la branche d'un diapason un stylet de métal (fig. 3). Faisons résonner le diapason et trempons le stylet dans l'eau. Autour du stylet apparaissent des ondes circulaires qui vont en s'élargissant. A grande distance, les vaguelettes sont pratiquement devenues des droites. Si quelque obstacle se présente à la surface de l'eau, l'onde est déformée.
Ce phénomène présente une certaine analogie avec les ondes lumineuses. Cependant, la lumière se propage dans le vide sans le support matériel d'un milieu. Les ondulations à la surface de l'eau sont

fig. 3

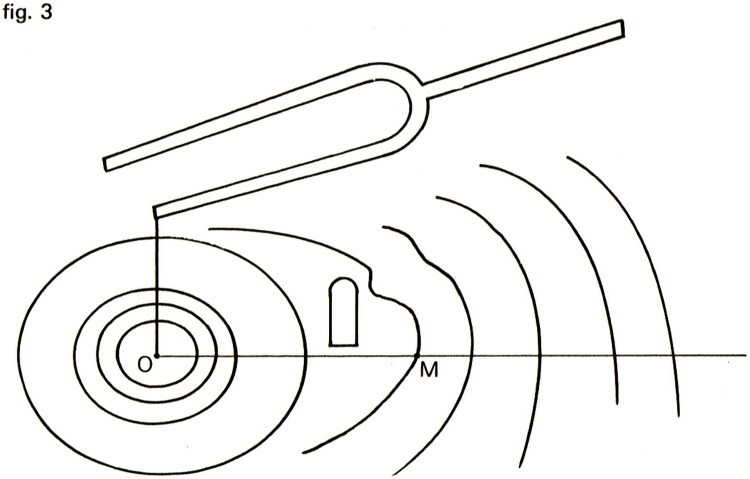
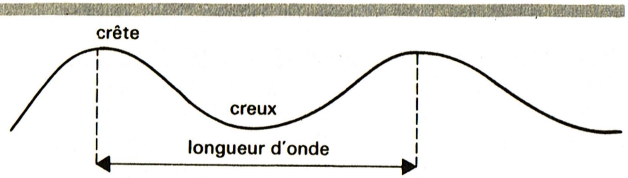


fig. 4



comparables aux vibrations transversales du champ électrique E. La distance qui sépare deux crêtes successives est la longueur d'onde du phénomène lumineux (fig. 4). Une vaguelette est un front d'onde, lieu des points de chaque onde en phase. La source étant unique et ponctuelle, les fronts d'onde sont des cercles ; pour la lumière, dans l'espace, ce seraient des sphères. La droite qui relie le stylet (la source de lumière) à une vaguelette (un front d'onde) est la direction de propagation OM de l'onde (fig. 3), perpendiculaire au front d'onde. A très grande distance du point source, le diamètre du cercle-front d'onde est devenu si grand qu'une petite portion de ce cercle est assimilable à une droite. Dans l'espace, le front d'onde est devenu plan et les directions de propagation sont parallèles.

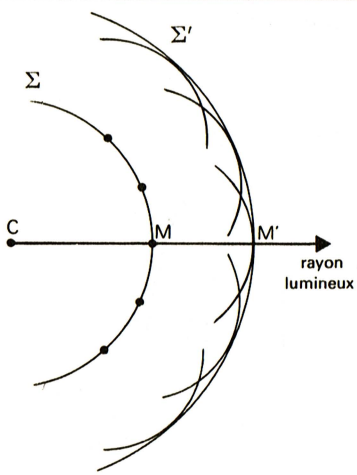
Principe de Huygens

Dès le XVIIe siècle, Huygens ♦, utilisant l'analogie développée ci-dessus, avait défini front d'onde et rayon lumineux et émis une théorie, dite des ondes enveloppes, sur la propagation des fronts d'onde.

Considérons au temps 0 un ébranlement en un point C de l'espace (fig. 5). Au temps t, le front d'onde résultant sera une sphère Σ de centre C et au temps t' une sphère concentrique Σ' de rayon supérieur.

♦ Christian Huygens (1629-1695). Fils d'une des plus riches familles de Hollande. Après des études de droit et de mathématiques, il se consacre uniquement à la science. Parmi ses œuvres : *les Secteurs coniques* (1651), *la Théorie des probabilités* (1657), *l'Horloge à balancier* (1657), *la Théorie ondulatoire de la lumière*.

fig. 5

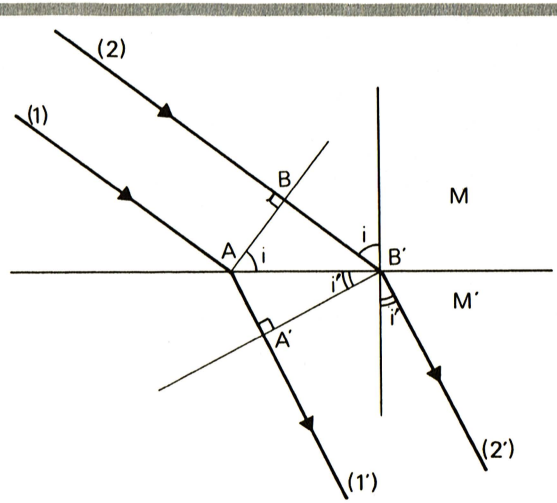


Huygens imagina que l'on pût passer du front Σ au front Σ' en considérant chaque point du premier front comme le centre d'un nouvel ébranlement donnant naissance à d'autres fronts élémentaires de forme sphérique. Le front commun enveloppant tous ces fronts secondaires constitue le nouveau front d'onde. Par construction, une droite perpendiculaire au premier front coupe le front suivant perpendiculairement. Ces droites, issues de C, indiquent le sens de propagation des fronts : ce sont les rayons lumineux (théorème de Malus).
L'hypothèse de la propagation rectiligne de la lumière dans les milieux isotropes, faite par Descartes au début du XVIIe siècle découle, ainsi, du principe de Huygens et du théorème de Malus.

Réfraction

Chacun connaît l'expérience simple de la règle trempée dans l'eau et qui semble brisée. Or, la règle ne s'est pas cassée : ce sont les rayons lumineux renvoyés par la règle qui, à la traversée de la surface de séparation eau/air, ont changé de direction. On dit qu'il y a eu réfraction. Faisons tomber un faisceau de rayons lumineux parallèles (limité par les rayons 1 et 2 [fig. 6]) sur cette surface de séparation des milieux M et M'. Les rayons étant parallèles, les fronts d'onde seront des plans — perpendiculaires à la page du livre, donc représentés par des droites, sections de ces plans par le plan de la page — perpendiculaires aux rayons. Considérons au temps t le front AB dans le milieu M et cherchons l'orientation, au temps t', du front A'B' dans le milieu M'. Le front d'onde est le lieu des points de chaque onde se trouvant au même instant dans le même état. La

fig. 6



lumière aura donc mis le temps $t' - t$ pour aller de A en A′ et de B en B′. Si la vitesse de la lumière est v (v') dans le milieu M (M′), ce temps s'écrira : $t' - t = v' \times AA' = v \times BB'$. Or, d'après la définition de l'indice :

$n = \frac{c}{v}$ et $n' = \frac{c}{v'}$, on aura $\frac{AA'}{BB'} = \frac{v}{v'} = \frac{n'}{n}$.

Définissons l'angle i (i') comme l'angle du front d'onde AB (A′B′) avec la surface de séparation.

Dans les triangles rectangles ABB′ et A′B′A :

$\sin i = \frac{BB'}{AB'}$ et $\sin i' = \frac{AA'}{AB'}$ donc $\frac{AA'}{BB'} = \frac{\sin i'}{\sin i} = \frac{n'}{n}$ ou

$n'.\sin i' = n.\sin i$. Connaissant le premier front d'onde et l'indice des milieux, on peut donc construire le front d'onde dans le second milieu ainsi que les rayons lumineux réfractés 1′ et 2′ perpendiculaires à ce front d'onde.

Les lois de la réfraction sont donc les suivantes :

— rayons incident et réfracté sont dans le plan d'incidence ♦ ;

— angles d'incidence ♦ et de réfraction sont liés par la relation $n'.\sin i' = n.\sin i$.

♦ Plan d'incidence ou plan contenant le rayon incident et la normale à la surface.

♦ Angle d'incidence (réfraction, réflexion) ou angle du rayon incident (réfracté, réfléchi) avec la normale à la surface.

Réflexion

Il nous est arrivé d'admirer l'image d'un arbre ou d'un monument reflétée par la surface de l'eau. Les rayons lumineux frappant l'objet en question sont renvoyés dans toutes les directions. Les rayons qui nous ont fourni cette image sont ceux qui, partis de l'objet et s'étant réfléchis à la surface de l'eau, ont pénétré dans notre œil (fig. 7).

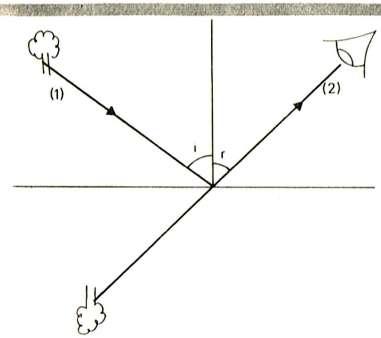
A l'aide de la notion de front d'onde et par un raisonnement analogue à celui développé pour la réfraction, on déduit les lois de la réflexion :

— rayons incident et réfléchi sont dans le plan d'incidence ;

— angles d'incidence et de réflexion sont égaux.

L'ensemble des résultats relatifs à la réfraction et à la réflexion ainsi que l'hypothèse de la propagation rectiligne des rayons lumineux constituent les lois de Descartes.

fig. 7



Angle limite et réflexion totale

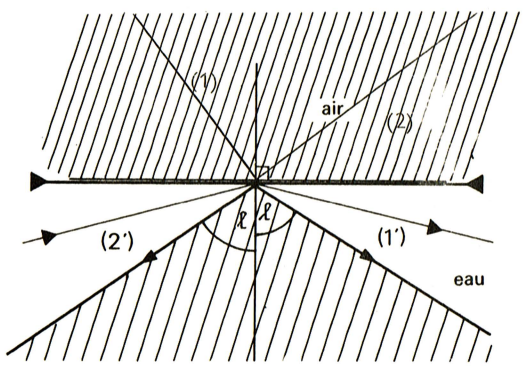
Envoyons un faisceau de rayons parallèles perpendiculairement à la surface d'une cuve d'eau, puis faisons varier l'orientation du faisceau, c'est-à-dire l'angle d'incidence 1 des rayons, de 0 à 90° (fig. 8). Laissant de côté le rayon réfléchi 2, examinons le rayon réfracté 1′. L'angle 1′ part, lui aussi, de 0°, croît, puis, pour 1 = 90° (le rayon incident étant alors rasant à la surface) prend sa valeur maximale l ♦, appelée angle limite. Donc, lorsque les rayons incidents balayent tout le demi-espace situé au-dessus de l'eau, les rayons réfractés restent contenus dans un cône de demi-angle au sommet l.

♦ $n \sin 90° = n' \sin l$,
or $\sin 90° = 1$,
donc $\sin l = \frac{n}{n'}$;
$n = 1$ pour l'air,
$n' = 1{,}3$ pour l'eau,
on trouve dans les tables : $l = 50°$.

Plaçons maintenant la source de lumière dans l'eau. D'après le principe du retour inverse de la lumière, le trajet suivi par la lumière est indépendant de son sens de propagation. Le rayon incident 1′ est maintenant dans l'eau et se partage entre le rayon réfléchi dans l'eau 2′ et le rayon réfracté dans l'air 1. Faisons varier l'angle d'incidence i' de 1′ de 0° à l. D'après le retour inverse, l'angle de réfraction i de 1 varie de 0 à 90°. L'angle r' du rayon 2′ varie, quant à lui, de 0° à l. Que vont devenir les rayons 1′ lorsque l'angle d'incidence i' devient supérieur à l? Nous avons vu qu'il ne leur correspondait pas de rayons réfractés 1. Ils vont donc se réfléchir en totalité. On dit qu'il y a réflexion totale. Ce phénomène se produit dans le sens eau-air et non dans le sens air-eau. C'est que l'indice de l'air (environ 1) est inférieur à celui de l'eau (environ 1,3). D'une manière générale, il ne peut y avoir réflexion totale que d'un milieu d'indice supérieur sur un milieu d'indice inférieur. Il est remarquable aussi qu'un rayon se réfractant d'un milieu d'indice inférieur dans un milieu d'indice supérieur se rapproche de la normale à la surface de séparation.

Une application récente du phénomène de réflexion totale consiste à conduire la lumière et l'image d'un point à un autre par n'importe quel trajet à l'aide d'un faisceau de fibres optiques.

fig. 8



Production de lumière monochromatique

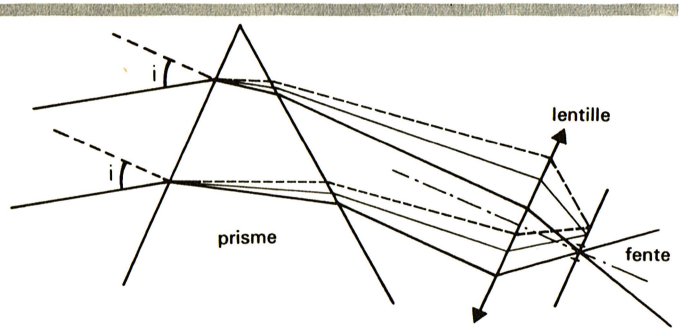
Dans les expériences précédentes, nous utilisions une lumière monochromatique. Mais comment peut-on la produire, alors que la lumière solaire contient, mélangées, toutes les radiations du spectre visible? Une solution simple consiste à utiliser un prisme de verre. Un faisceau de rayons parallèles de lumière blanche (lumière solaire) tombant sur l'une des faces du prisme va se réfracter (fig. 9), suivant la loi des sinus : $n.\sin i = n'.\sin i'$. Or, l'indice n de l'air est voisin de 1 pour toutes les radiations. Par contre, l'indice n' du verre dépend de la radiation considérée. A chaque valeur de n' correspond un angle i' différent. Donc, à chaque radiation correspond un angle de réfraction différent. Les rayons bleus, jaunes, rouges suivent alors des trajets différents à l'intérieur du prisme. La seconde réfraction ne fait que les séparer un peu plus. A la sortie du prisme, l'éventail des radiations du spectre visible est donc ouvert. Les « rayons rouges » correspondant aux grandes longueurs d'onde sont peu déviés, tandis que les « rayons bleus ou violets » correspondant aux courtes longueurs d'onde sont fortement déviés. Il suffit alors d'isoler la radiation qui nous intéresse à l'aide d'une lentille et d'une fente fine. Les appareils produisant une lumière monochromatique sont appelés monochromateurs. Ils comprennent parfois deux prismes et peuvent fournir une radiation très pure dont la longueur d'onde ne s'étend que d'une dizaine d'angströms ♦ autour de la longueur d'onde souhaitée. Nous verrons plus loin d'autres moyens de produire de la lumière monochromatique : réseaux, filtres interférentiels...

♦ 1 angström = 1 dix millième de micron = 10^{-4} micron = 10^{-7} mm = 10^{-10} m.

Il existe des sources lumineuses dont l'émission ne comporte pas toutes les longueurs d'onde, mais seulement un certain nombre, dont quelques-unes dans le spectre visible. On peut alors facilement les isoler à l'aide de filtres. Cette lumière est produite par une décharge électrique dans des gaz comme l'hydrogène, l'argon, le néon ou dans des vapeurs de certains corps vaporisables à haute ou basse pression, tels le sodium, le mercure, le cadmium...

La raie rouge du cadmium, particulièrement fine, a été choisie en 1893 pour la mesure du mètre étalon en longueurs d'onde.

fig. 9



INTERFÉRENCES - COHÉRENCE♦ - INCOHÉRENCE

♦ Voir M. Françon : *Diffraction, cohérence en optique* (Gauthier-Villars, Paris, 1964).

Poursuivons l'analogie observée entre les ondes émises par un diapason et les ondes lumineuses. Utilisons cette fois-ci deux diapasons D_1 et D_2, chaque diapason pouvant être excité par un courant électrique de fréquence variable et portant sur l'une de ses branches un stylet de métal trempant dans l'eau. Effectuons trois expériences :

— *Expérience A :* D_1 et D_2 sont accordés sur la même fréquence et commencent à vibrer en même temps. Non seulement les fronts d'onde présentent le même écartement, mais les maximums et les minimums de vibration des deux ondes se produisent en même temps. Les ondes émises sont en phase. Dans la région de recouvrement des deux systèmes, les ondes initiales ont été, par endroits, comme effacées. Les zones d'effacement forment un réseau régulier. Les deux ondes en phase et de même fréquence ont produit un phénomène d'interférences.

— *Expérience B :* l'expérience A est reprise en faisant démarrer la vibration à des instants différents pour D_1 et D_2. Les maximums et les minimums de chaque vibration sont alors décalés dans le temps et l'espace. Les ondes émises présentent une différence de phase constante. On observe alors le même phénomène que dans l'expérience A, bien que légèrement décalé dans l'espace.

— *Expérience C :* même expérience qu'en B, mais en arrêtant et en faisant repartir l'excitation de D_1 et D_2 d'une façon aléatoire. Les ondes émises présentent alors une différence de phase totalement aléatoire et on observe un brouillage complet à la surface de l'eau. Le tableau ci-dessous montre que les interférences ne se sont produites que lorsque les deux sources étaient cohérentes entre elles, c'est-à-dire de même fréquence et de différence de phase constante (si cette différence est nulle, les deux sources sont dites synchrones).

expérience	*A*	*B*	*C*
fréquences	égales	égales	égales
phases	égales	différentes	différentes
différence de phase	nulle	constante	aléatoire
sources et ondes émises	cohérentes	cohérentes	incohérentes
interférences	oui	oui	non

Émission de la lumière

Essayons de reproduire les trois expériences précédentes à l'aide de deux sources de lumière monochromatique identiques S_1 et S_2.

Observons le phénomène obtenu sur un écran dans la région où les deux faisceaux lumineux se recoupent. Cette zone est plus éclairée que s'il n'y avait qu'une seule source, mais en aucun cas il n'y a « effacement » de la lumière, aucun phénomène d'interférences ne peut être observé. Notre analogie est donc un peu simpliste. Elle ne tient pas compte, en effet, du phénomène d'émission de la lumière par une source.

Développons rapidement le phénomène d'émission tel que le présente la théorie classique. Une source est composée d'une multitude d'atomes — plusieurs millions de milliards au mm^3 — se comportant comme des petits oscillateurs élémentaires analogues aux diapasons. Chaque oscillateur vibre à la fréquence ν caractérisant la radiation émise par la source. Du fait de l'émission de la source, chaque oscillateur perd de l'énergie, s'amortit et cesse d'émettre. Puis il est relancé par l'énergie qui alimente la source — par exemple, le courant électrique — et recommence à vibrer. La fréquence de cette nouvelle vibration est la même que celle du mouvement précédent.

Sans sources cohérentes, il ne peut y avoir d'interférences

Par contre, la phase et l'amplitude sont totalement différentes. Ajoutons que ce phénomène se reproduit environ un milliard de fois par seconde et que tous les oscillateurs composant la source ne sont pas en phase. L'émission de la source résulte donc d'une multitude de vibrations très courtes (10^{-9} seconde ♦) survenant d'une manière aléatoire. Une telle source est incohérente.

♦ 10^{-9} seconde = 1 milliardième de seconde.

Chacune des sources S_1 et S_2 étant individuellement incohérente, il est impossible d'obtenir des interférences. Mais, alors, comment obtenir des interférences, puisque chaque source de lumière sera toujours incohérente (excepté le laser)?

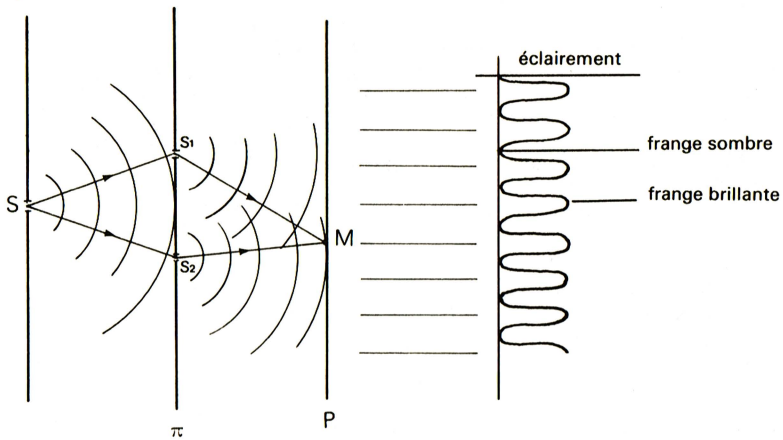
Un artifice consiste à dédoubler une source incohérente en deux sources secondaires, elles-mêmes individuellement incohérentes. Certes, leurs phases varient de façon aléatoire, mais au même instant et de la même manière ; leur différence de phase est donc nulle (ou constante). Les ondes émises vont donc pouvoir interférer, car les deux sources sont cohérentes entre elles ♦.

♦ Une source ou une onde prise individuellement est dite cohérente si sa *phase* est constante dans le temps (ou varie très lentement).
— 2 sources ou 2 ondes sont dites cohérentes entre elles si elles ont même fréquence et présentent une différence constante (par exemple nulle) dans le temps.

L'expérience d'Young

Éclairons un écran π percé de deux fentes fines et rapprochées S_1 et S_2 (fig. 10) à l'aide d'une source monochromatique S diaphragmée par une fente fine parallèle à S_1 et S_2. A la traversée des fentes, la lumière est diffractée dans toutes les directions et les ondes émises par S_1 et S_2 sont alors cohérentes entre elles. Sur un écran P parallèle à π, on obtient un phénomène d'interférences sous forme de franges alternativement sombres et brillantes — de la couleur associée à la radiation émise par la source — parallèles aux fentes.

fig. 10



Étude des franges

Les ondes issues de S_1 et S_2 sont en phase. Si elles mettent le même temps pour parvenir au point M du plan d'observation P, elles sont encore en phase, sinon il existe, entre elles, un déphasage φ proportionnel à la différence entre les temps mis par les deux ondes pour arriver en M, soit : $\frac{S_1M - S_2M}{v}$, où v est la vitesse de la lumière dans le milieu considéré. Ou encore $\frac{n}{c}(S_1M - S_2M)$, où n est l'indice du milieu et c la vitesse de la lumière dans le vide. La quantité $\Delta = n(S_1M - S_2M)$ est appelée différence des chemins optiques. Le déphasage des deux ondes est alors : $\varphi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda}$. Les franges d'interférences sont le lieu des points d'égale différence de phase. Quelles sont donc les valeurs prises par le déphasage φ sur les franges que l'on observe parallèlement aux fentes ?

Dans l'expérience d'Young, au centre de l'écran, sur la médiatrice de S_1S_2 se trouve toujours une frange brillante (fig. 10) pour laquelle $\Delta = 0$, $\varphi = 0$, les ondes sont en phase. Cette frange brillante est entourée de deux franges sombres pour lesquelles $\varphi = \pi$, les ondes sont en opposition de phase ; puis, de part et d'autre, deux nouvelles franges brillantes pour lesquelles $\varphi = 2\pi$; puis deux franges sombres pour lesquelles $\varphi = 3\pi$, etc. Si d est la distance des plans π et P, $2a$ la distance des fentes S_1 et S_2, on calcule l'écart entre franges sombres et franges brillantes qui est constant et égal à $i = \frac{\lambda d}{2a}$, i est appelé interfrange.

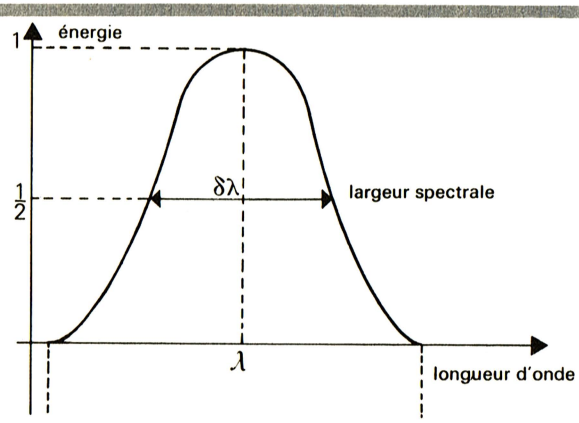
Interférences en lumière non monochromatique et cohérence temporelle

Supposons que la source S émette deux radiations de longueurs d'onde voisines λ et λ' ♦. Ces deux radiations produisent chacune un système d'interférences d'interfranges voisins $i = \frac{\lambda d}{2a}$ et $i' = \frac{\lambda' d}{2a}$ caractérisés en chaque point du plan d'observation P par deux déphasages $\varphi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda}$ et $\varphi' = \frac{2\pi\Delta}{\lambda'}$. Au centre des systèmes où $\Delta = 0$, $\varphi = \varphi'$, on obtient une seule frange brillante. Puis, en s'éloignant du centre, la différence de marche Δ restant faible, les deux systèmes de franges restent en coïncidence, mais leur interfrange est légèrement différent. Après avoir parcouru un nombre n de franges (environ 500 dans notre exemple), $\frac{\Delta}{\lambda}$ et $\frac{\Delta}{\lambda'}$ diffèrent d'environ 1/2 ; dans ces conditions, les franges brillantes du premier système coïncident avec les franges sombres du second et l'ensemble est brouillé. Si l'on continue de s'éloigner, Δ augmente et, aux environs de la frange $2n$ (1 000, dans notre exemple), $\frac{\Delta}{\lambda}$ et $\frac{\Delta}{\lambda'}$ diffèrent de 1, il y a une nouvelle fois coïncidence des franges de même nature, d'où visibilité maximale, etc.

♦ Par exemple, dans la lampe à vapeur de sodium, les raies 0,5890 micron et 0,5896 micron.

Si, au lieu d'utiliser les deux radiations λ et λ', on envisage une répartition continue de longueurs d'onde dans le petit intervalle spectral $d\lambda = \lambda - \lambda'$, on constate que l'on n'observe pas la réapparition des franges après la première disparition obtenue pour $\frac{\Delta}{\lambda'} - \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{1}{2}$, soit sensiblement $\frac{\Delta}{\lambda} = \frac{2\lambda}{d\lambda}$. Les sources lumineuses n'étant jamais rigoureusement monochromatiques (fig. 11), ce

fig. 11



résultat permet une mesure assez précise de la largeur spectrale $\delta\lambda$ de la raie émise $\left(\text{par définition, } \delta\lambda = \frac{d\lambda}{2}\right)$: $\delta\lambda = \frac{\lambda^2 \text{ moyen}}{\Delta \text{ disparition}}$, la longueur d'onde moyenne (λ moyenne) émise par la source étant connue, et mesurée la différence de marche Δ à partir de laquelle les franges sont brouillées.
La différence de marche maximale ainsi mesurée est aussi appelée longueur de cohérence. La cohérence dont il s'agit est la cohérence temporelle caractéristique de l'émission de la source et dépendant du temps de vibration de chaque « atome-oscillateur ». D'après le tableau ci-dessous, c'est le laser qui possède la meilleure cohérence temporelle, ou encore dont la largeur spectrale est la plus faible, ou plus simplement qui émet la lumière la plus monochromatique.

sources	longueur de cohérence
mercure basse pression	15 cm
mercure haute pression	0,5 cm
cadmium	30 cm
krypton 84 à basse température	80 cm
laser hélium-néon	plus de 100 m

longueur de cohérence de diverses sources lumineuses couramment utilisées en optique

Si nous utilisons maintenant une source de lumière dite blanche (par exemple, le Soleil), on obtient le spectre suivant : au centre, une frange blanche, superposition de toutes les franges brillantes monochromatiques, puis une frange sombre correspondant pratiquement au minimum de toutes les radiations. Pour la frange brillante suivante, les différentes valeurs de i vont intervenir. On obtiendra une frange quasiment blanche, avec peu de violet et de rouge, irisée de violet vers le centre et de rouge vers l'extérieur. Puis les franges monochromatiques apparaissent plus nettement et, enfin, l'ensemble se brouille en redonnant un blanc où manquent certaines radiations.

Influence de la largeur de la source et cohérence spatiale

Reprenons l'expérience d'Young en lumière monochromatique, mais en utilisant deux fentes sources identiques S et S′ infiniment fines. Chacune des fentes va donner un système de franges analogue à celui de l'expérience initiale.
Si, au départ, S et S′ sont confondues, nous obtenons un phénomène unique. Écartons progressivement S et S′ : les deux systèmes se dédoublent, puis les franges brillantes du premier coïncident avec les franges sombres du second (l'interfrange étant le même), il y a brouillage. Un phénomène net apparaît à nouveau lorsque les franges de même nature coïncident, etc.

Suivant le schéma de raisonnement du paragraphe précédent, considérons maintenant une fente source S unique de largeur *l* variable. Au lieu de deux systèmes de franges, nous obtenons la superposition de nombreux systèmes dus aux fentes infiniment fines contenues dans la fente S. On observe alors le même phénomène que si la fente S était infiniment fine, mais le contraste γ des franges varie en fonction de la largeur *l* de la source. On peut se faire une idée de la variation du contraste en essayant d'associer, à une fente fine S_{n+} (fig. 12) de la source, la fente fine S_{n-} qui produit un système de franges en opposition avec celui de S_{n+} (frange brillante sur frange sombre). Les effets de ces sources fines s'annulent ; seules contribuent au phénomène les fentes fines que l'on n'a pu associer deux à deux.

fig. 12

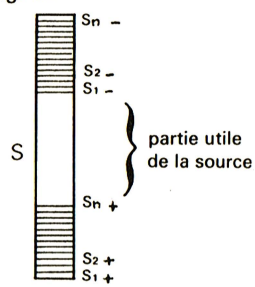
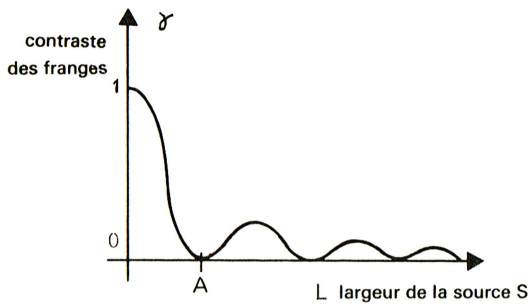


fig. 13



C'est ainsi que lorsque les bords extrêmes de S produisent un système en opposition avec celui du centre de S, il y a brouillage total (contraste nul) [fig. 13, point A], chaque fente élémentaire ayant trouvé une fente associée. Puis le contraste fluctue, mais en diminuant sans cesse pour tendre vers 0. Les fentes sources secondaires S_1 et S_2 sont alors devenues incohérentes. La cohérence dont il s'agit ici est la cohérence spatiale liée aux dimensions de la fente source S et à sa position par rapport à S_1 et S_2. Lorsque l'angle sous lequel on voit la fente S du milieu de S_1S_2 est faible, il y a cohérence spatiale et les franges sont bien visibles (contraste voisin de 1). Au contraire, lorsque cet angle est important, il y a incohérence spatiale et les franges sont brouillées (contraste voisin de 0). La situation intermédiaire correspond à une cohérence dite partielle.

Lames minces et localisation des franges

Nous voyons chaque jour des franges d'interférences sans avoir à recourir au montage des fentes d'Young et sans que les conditions de cohérence spatiale (largeur de la source) ni temporelle (monochromaticité de la source) soient réunies. Ainsi, les franges colorées

que l'on peut admirer à la surface d'une bulle de savon ou sur la pellicule d'huile d'une flaque d'eau.

Les franges d'interférences peuvent être localisées sur une lame mince...

Observons que, dans chacun de ces cas, les franges sont localisées sur une surface bien déterminée (bulle, flaque...) et que les épaisseurs mises en jeu sont très faibles (paroi de la bulle, pellicule d'huile...). Soit I le point de la surface examiné par l'œil (fig. 14 *a*). Les rayons lumineux arrivant dans l'œil, après réflexion en I sur cette surface, proviennent de divers points de la source lumineuse. Chacun de ces rayons est double (fig. 14 *b*) : en arrivant en I, le rayon SI se dédouble, en effet, en un rayon réfléchi sur la première face de la lame et en un

fig. 14-a

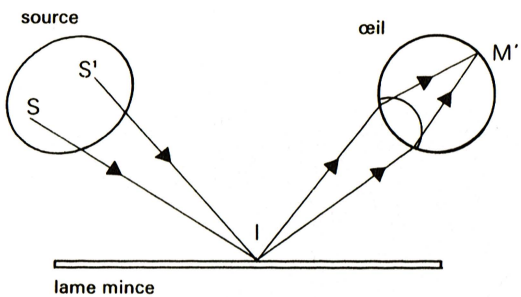
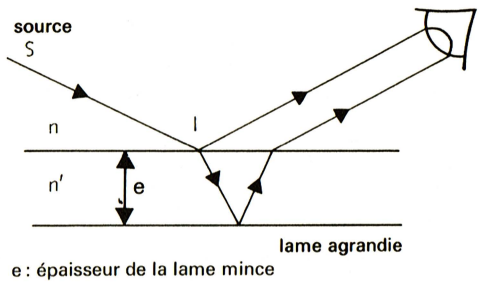


fig. 14-b



e : épaisseur de la lame mince

rayon réfracté à l'intérieur de la lame, réfléchi par la deuxième face et renvoyé vers l'œil. Les deux rayons ainsi obtenus possèdent une différence de phase φ proportionnelle à la différence des chemins optiques suivis. Provenant d'un point source unique, ils peuvent interférer. Tous les rayons provenant de la source, s'étant réfléchis en I et ayant pénétré dans l'œil, présentent le même déphasage φ donc le même état interférentiel ; les phénomènes produits vont donc s'ajouter en intensité et renforcer le phénomène global observé par l'œil en I. Suivant que le déphasage φ est un multiple pair ou impair de π, on obtiendra, comme dans l'expérience d'Young, un maximum de lumière ou, au contraire, une extinction. A noter une légère nuance : la différence de marche Δ (proportionnelle à l'épaisseur de la lame en I) doit être augmentée de la quantité $\frac{\lambda}{2}$ lorsque l'un des rayons s'est réfléchi d'un milieu d'indice *n* sur un milieu d'indice supérieur (par exemple, air sur verre), ce que l'on traduit parfois en disant que les deux rayons ont subi des réflexions de natures différentes.

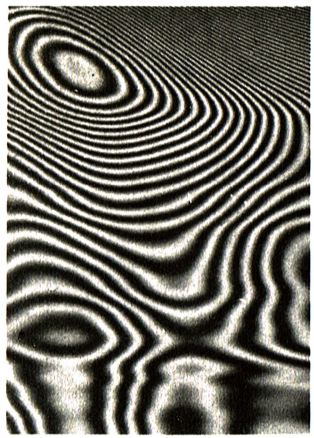
En lumière blanche, seules vont donc manquer dans la lumière réfléchie vers l'œil les radiations pour lesquelles il y a extinction

en I. La lumière réfléchie va alors prendre la teinte complémentaire de la radiation éteinte en I, car il n'y en a généralement qu'une dans le spectre visible. Ces teintes, répertoriées dans une liste — appelée échelle des teintes de Newton —, correspondent à des valeurs déterminées du déphasage que l'on peut ainsi connaître avec grande précision sans aucun calcul. Le tableau ci-dessous est un extrait de cette échelle. Il indique la différence de marche Δ entre les rayons qui ont interféré dans deux cas :

— lorsque les rayons ont « subi des réflexions de nature différente » : $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\left(\Delta + \frac{\lambda}{2}\right) = (2k + 1)\,\pi$, où k est un nombre entier ; lorsque $\Delta = 0$, $\varphi = \pi$, il y a extinction ou frange sombre ;

— lorsque les rayons ont « subi des réflexions de même nature » : $\varphi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = (2k + 1)\,\pi$; lorsque $\Delta = 0$, $\varphi = 0$, il y a maximum de lumière ou frange brillante.

Δ micron	réflexions de nature différente	réflexions de même nature
0,00	noir	blanc
0,10	gris lavande	blanc
0,16	bleu gris	blanc-brun
0,23	blanc vert	brun
0,26	blanc	rouge
0,28	jaune	teinte sensible
0,50	orangé	vert bleu
0,55	teinte sensible	vert
0,66	bleu	orangé
0,83	vert clair	teinte sensible
1,10	teinte sensible	vert



Franges d'égale épaisseur d'une lame mince d'épaisseur variable (Springer Verlag, Berlin).

Une application des interférences : le contrôle des surfaces planes ou sphériques

Si nous nous plaçons dans un cas simple où les rayons tombent perpendiculairement à la surface à étudier, les franges, lieu des points d'égale différence de phase, correspondent alors aux zones d'égale épaisseur :

— Ainsi, dans une bulle de savon, ce sont des cercles concentriques plus ou moins déformés. La tache centrale devenant noire au moment de l'éclatement (lorsque l'épaisseur s'annule, $\Delta = 0$, $\varphi = 0$, d'où extinction).

— Dans le cas d'une lame d'air emprisonnée entre deux surfaces planes de verre, faisant un petit angle, les franges sont des droites parallèles à l'arête du dièdre ♦. En lumière monochromatique, l'équidistance

♦ Dièdre : figure formée par deux plans limités à leur droite d'intersection.

des franges correspond à une variation d'épaisseur de $\frac{\lambda}{2}$. Ce procédé, dit du coin d'air, est couramment utilisé en optique pour contrôler la planéité des surfaces. La surface à étudier est posée sur un plan étalon, pièce en verre rigoureusement plane. L'ensemble est éclairé en lumière monochromatique. Les déformations observées dans les franges qui devraient être rectilignes renseignent sur la position et l'importance des défauts de la lame.

Un procédé analogue est utilisé pour tester des surfaces convexes (fig. 15). La lentille plan convexe est placée sur le plan étalon, la partie convexe étant en contact avec le plan au point 0. Les franges d'interférences sont circulaires, puisque les zones d'égale épaisseur sont des cercles centrés sur 0. Le diamètre et la régularité des franges, appelées anneaux de Newton, renseignent alors sur la courbure de la lentille.

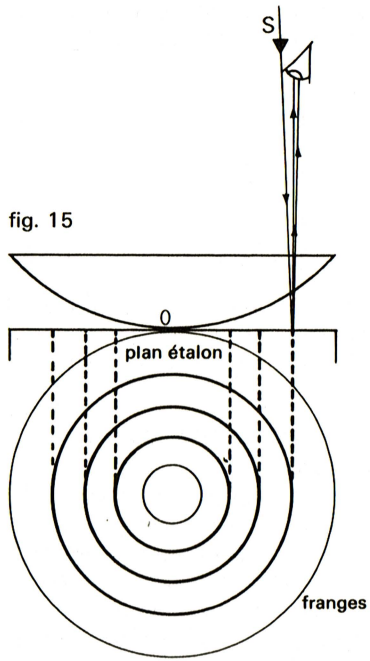


fig. 15

Les couches minces

On réalise maintenant industriellement des couches minces, analogues aux parois d'une bulle de savon, par dépôt, sur une surface de verre parfaitement plane, d'un sel comme le fluorure de magnésium, le sulfure de zinc, etc. Le procédé de dépôt le plus utilisé est celui de l'évaporation sous vide. On dispose la lame de verre et la substance à évaporer dans une cloche métallique ou en verre, parfaitement étanche, reliée à une pompe à vide. La pompe est mise en route et l'on contrôle la baisse de la pression de l'air dans la cloche. Lorsque la pression atteint quelques millièmes ou quelques millionièmes de millimètre de mercure, on chauffe électriquement la substance à évaporer. Lorsque sa température de fusion est atteinte, elle s'évapore, se dépose dans l'enceinte et notamment sur la lame, sous forme d'une couche extrêmement mince. L'épaisseur de la couche dépend du

temps pendant lequel on maintient la substance à sa température de fusion — les épaisseurs varient de quelques dizaines d'angströms à quelques dizaines de microns. La qualité de la couche dépend essentiellement de l'importance du vide atteint dans la cloche.

Propriétés optiques des couches minces

Envoyons un faisceau de rayons parallèles perpendiculairement à la couche. Les rayons réfléchis sur la couche et ceux qui se sont réfléchis sur le verre présentent une différence de marche égale à 2 *ne* (les deux réflexions étant supposées de même nature, il n'y a pas lieu d'ajouter $\frac{\lambda}{2}$). Il se produit donc un phénomène d'interférences à la surface du verre et la radiation, tombant sur la couche, ne sera pas réfléchie si le déphasage φ qui lui est associé est égal à π ou à un multiple impair de π, donc si « l'épaisseur optique » *ne* est égale à $\frac{\lambda}{4}$ (ou un multiple impair de $\frac{\lambda}{4}$). On peut ainsi, en utilisant des empilements de couches minces d'épaisseurs et d'indices différents, supprimer presque totalement la réflexion dans tout le spectre visible. L'intérêt de cette suppression est considérable.

Une application des couches minces : la suppression des réflexions parasites dans les instruments d'optique

Dans une paire de jumelles à prismes, il y a jusqu'à dix surfaces air-verre (30 dans un périscope). A chaque fois que la lumière rencontre une telle surface, la plus grande partie est transmise (environ 95 %) pour former l'image ; l'autre partie est réfléchie sur la surface du verre, revient vers la surface précédente et, après diverses réflexions et transmissions, sort, le plus souvent, dans une direction parallèle au faisceau qui forme l'image. On perd ainsi 40 à 75 % de la lumière et l'image obtenue est entourée d'un halo de lumière parasite qui rend ses contours flous et diminue le contraste. Le dépôt judicieux de couches minces sur les surfaces de verre permet de limiter cette perte à 10 % et de diminuer fortement le halo de lumière parasite.

Les interféromètres

Il existe de nombreuses autres méthodes pour produire des interférences. Nous en citerons deux intéressantes pour leurs applications.

L'interféromètre de Michelson

L'idée de Michelson était de réfléchir partiellement une onde, puis de superposer l'onde réfléchie et l'onde transmise. Le système utilisé

comprend une lame de verre L (fig. 16) dont une face est recouverte d'une couche mince de métal (argent ou aluminium) laissant passer la moitié de la lumière incidente et réfléchissant l'autre moitié. Cette lame semi-transparente est inclinée à 45° sur deux axes perpendiculaires où l'on place les miroirs plans M_1 et M_2. Le faisceau f_1 transmis par L tombe sur M_1, revient sur L, est partagé en deux : une moitié revient vers la source et n'intervient pas dans l'expérience, l'autre moitié est réfléchie vers l'observateur. Le faisceau réfléchi par L tombe sur M_2, revient sur L et c'est, cette fois-ci, la partie transmise par L qui revient vers l'observateur et intervient dans l'expérience. Les conditions d'interférences sont ainsi réunies : il y a bien cohérence des deux ondes, la source S étant commune aux deux faisceaux. La différence de marche entre les deux vibrations revenant vers l'observateur sera égale à deux fois la distance (LM_1 — LM_2). Rabattons fictivement le trajet LM_1 en LM'_2. Nous pouvons rendre compte du phénomène observé en considérant les interférences produites par le coin d'air compris entre les deux lames (et non plus miroirs) M_1 et M'_2.

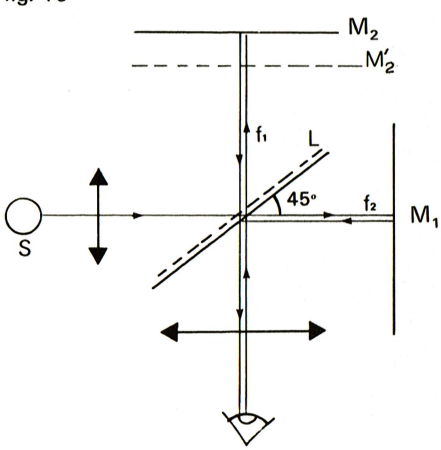
— Si M_1 et M'_2 forment un petit angle, on observera, à la loupe, les franges équidistantes du coin d'air.

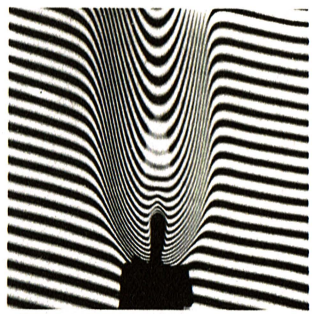
— Si M_1 et M'_2 sont parallèles, on verra les franges des lames minces et, en lumière blanche, on observera les teintes de l'échelle de Newton.

— Si M_1 est remplacé par une surface réfléchissante dont on veut contrôler la planéité, on se retrouve dans les conditions de l'expérience décrite page 379 avec le plan étalon.

— Si M_1 est monté sur un chariot dont le déplacement, parallèlement à l'axe LM_1, est repéré avec une grande précision, on peut mesurer

fig. 16





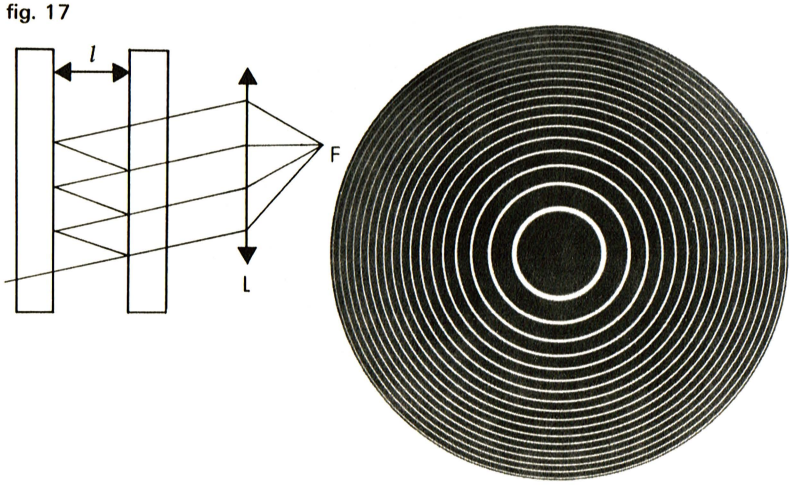
Franges d'égale épaisseur déformées par les variations d'indice au voisinage de la flamme d'une bougie (Springer Verlag, Berlin).

la largeur spectrale d'une source de lumière selon la méthode exposée page 375. Le même montage permet également de comparer des longueurs avec grande précision. Inclinons M_1 de façon à observer les franges du coin d'air. Si nous déplaçons maintenant M_1 parallèlement à l'axe LM_1, chaque fois que l'épaisseur du coin aura varié d'une demi-longueur d'onde, une frange du système sera remplacée par la frange suivante. Connaissant la longueur d'onde et le nombre de franges qui ont défilé, on en déduit la longueur d du déplacement de M_1. Inversement, déplaçant M_1 d'une longueur d connue et comptant le nombre de franges qui ont défilé, on en déduit la longueur d'onde. Cette méthode, apparemment très simple, n'est pas la plus pratique ni la plus précise. Il faut, en effet, compter sans erreur plusieurs centaines de milliers de franges pour mesurer une distance de 10 cm. Seul l'appareil de Pérot et Fabry permettra de réunir simplicité et précision.

L'interféromètre de Fabry-Pérot

L'appareil est constitué de deux lames à faces planes et parallèles, polies avec une très grande précision (fig. 17). Les deux faces en regard sont recouvertes d'une couche mince d'argent qui réfléchit 99 % de la lumière. La lumière qui a pénétré entre les deux miroirs est donc « prise au piège » et va subir un mouvement de va-et-vient, se réfléchissant successivement sur chacune des couches minces. On montre alors que les interférences ne se produisent pas seulement entre deux rayons, mais entre tous les rayons réfléchis, augmentant considérablement l'intensité du phénomène observé. Si le faisceau des rayons incidents est parallèle à la face d'entrée du Fabry-Pérot,

fig. 17



Anneaux observés avec l'interféromètre de Fabry-Pérot, éclairé par une source émettant plusieurs radiations monochromatiques (Springer Verlag, Berlin).

l'image obtenue, à la sortie, dans le plan focal d'une lentille L, sera un point F, sombre ou brillant suivant la valeur de la différence de marche 2 l (où l est la longueur de la cavité).
Le phénomène, obtenu avec une source large qui envoie des rayons sous toutes les incidences sur la surface, sera un système d'anneaux circulaires centrés sur F. Ces cercles concentriques sont lumineux et très fins et se détachent nettement sur un fond obscur.
Si l'on déplace une lame par rapport à l'autre, on voit défiler les anneaux comme dans l'interféromètre de Michelson et l'on peut effectuer les mêmes mesures de largeur spectrale, de longueur d'onde ou de déplacement. La précision est cependant très supérieure, car on peut repérer la position des anneaux avec une très grande exactitude. On peut ainsi évaluer une longueur d'onde avec une précision relative approchant le millionième.

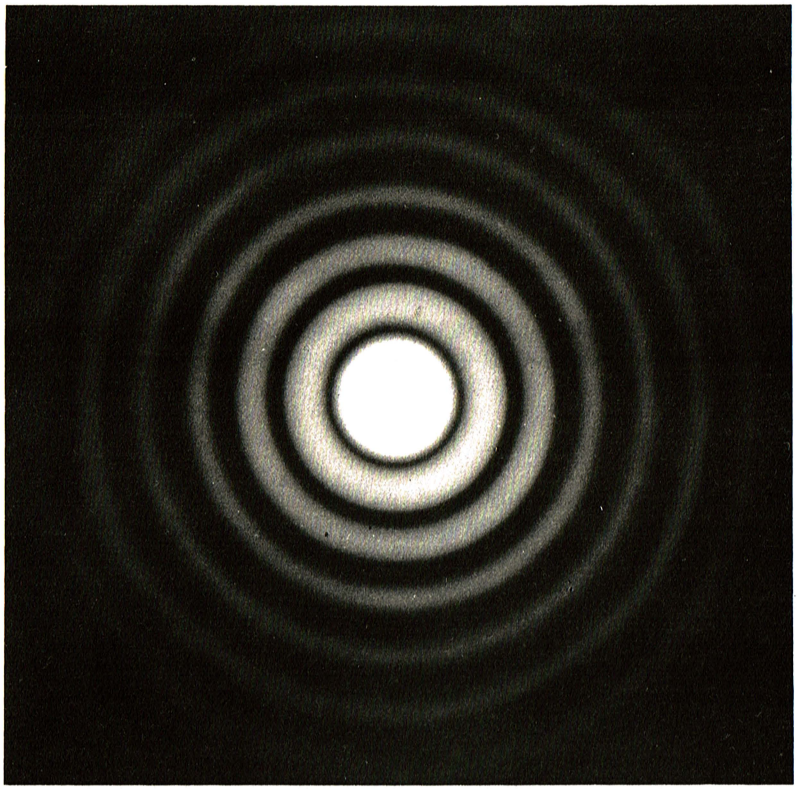
Filtres interférentiels

Le Fabry-Pérot, étant éclairé en lumière blanche, ne laisse passer que les radiations pour lesquelles la différence de marche 2 l est un multiple de la longueur d'onde. Le nombre de ces radiations est donc limité et l'on peut ainsi en isoler une, d'autant plus monochromatique que l'épaisseur l sera grande et le facteur de réflexion des couches minces déposées sur les lames élevé. Pour obtenir des radiations ayant une largeur spectrale faible, on utilise maintenant des empilements de couches minces transparentes et l'on remplace la lame d'air par des matériaux tels que la cryolithe, le fluorure de lithium ou de magnésium...
De tels filtres ne sont pas seulement utilisables dans le domaine visible mais aussi dans l'infrarouge et l'ultraviolet. Les satellites artificiels sont équipés de couches minces pour régulariser leur température. Ces couches, laissant passer le rayonnement visible, réfléchissent l'infrarouge qui produirait un échauffement important.

DIFFRACTION ET FORMATION DES IMAGES

Image d'un point et tache de diffraction

Considérons le système le plus simple de la formation d'une image : celui de l'appareil photo à bon marché, dont l'objectif est composé d'une seule lentille O de diamètre d. Mettons au point l'appareil sur un plan noirci P, perpendiculaire à l'axe optique de l'objectif. L'image des points de P se formera dans le plan P′ du film. Perçons un trou A dans le plan P et éclairons ce trou. L'optique géométrique nous apprend que les rayons lumineux issus du point A et recueillis par l'objectif O vont passer par un même point A′ de P′. L'image du point brillant A est un point brillant A′. Plaçons maintenant,



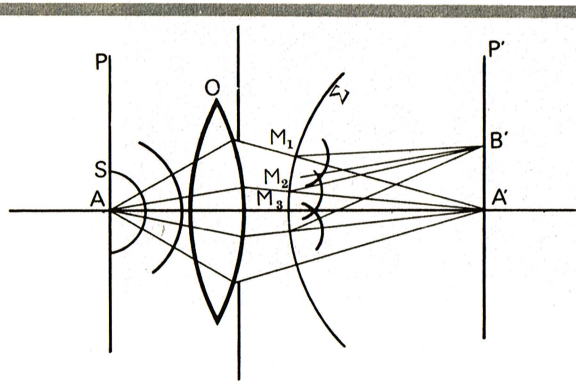
Tache d'Auy.
Diffraction par un diaphragme circulaire (Springer Verlag, Berlin).

devant l'objectif O, un diaphragme qui réduit son diamètre utile *d* à celui d'un trou minuscule. L'optique géométrique ne faisant pas intervenir le diamètre de l'objectif, l'image A′ ne doit pas être modifiée ; or, on s'aperçoit qu'il n'en est pas ainsi. L'image de A est maintenant une tache lumineuse entourée d'anneaux brillants, dont l'intensité va en diminuant au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre A′ du phénomène. L'image d'un point n'est plus un point. Nous avons atteint une limite au-delà de laquelle les lois de l'optique géométrique ne sont plus applicables. Les phénomènes apparus sont appelés phénomènes de diffraction et sont directement liés à la nature ondulatoire de la lumière.

Principe de la diffraction

Le principe de Huygens judicieusement utilisé par Fresnel a permis de donner une explication à ces phénomènes. La lumière issue de A (fig. 18) se propage jusqu'à O sous forme de surfaces

fig. 18



d'onde sphériques de centre A. Les surfaces d'onde Σ transmises par l'objectif parfait sont également sphériques et centrées sur A'. D'après Huygens : chaque point d'une surface d'onde Σ se comporte comme une nouvelle source de vibrations et les ondes émises par tous les points d'une même surface Σ sont en phase. Nous nous trouvons placés dans les conditions exactes des expériences d'interférences, mais, cette fois-ci, avec une infinité de sources M_1, M_2... sur la surface d'onde Σ au lieu des deux sources S_1 et S_2. Rappelons les résultats relatifs aux interférences :

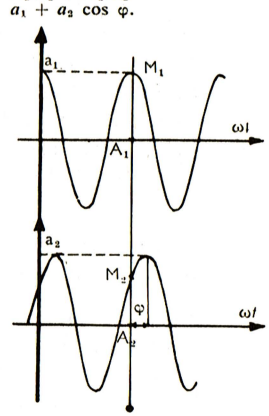
— Lorsque les sources sont cohérentes entre elles, il y a interférence. Le phénomène observé en un point B' résulte de la composition des amplitudes ♦ des vibrations envoyées par les sources en ce point. L'œil est alors sensible à l'éclairement résultant (carré de l'amplitude) et observe des franges.

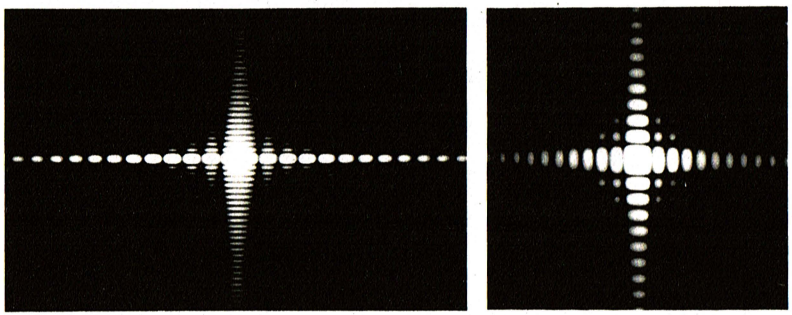
— Lorsque les sources sont incohérentes entre elles, il ne peut y avoir interférence. Le phénomène observé en B résulte de l'addition des intensités des vibrations arrivant en B'. L'œil observe alors un éclairement moyen constant.

Nous sommes placés dans le premier cas puisque les points de la surface d'onde Σ sont non seulement cohérents entre eux, mais en phase, donc synchrones. Nous avons réalisé avec le point source A et l'objectif O un éclairage cohérent. Il faut donc composer en B' les amplitudes des vibrations diffractées par tous les points de la surface d'onde Σ.

Entre les vibrations issues de M_1 et M_2 existera un déphasage $\varphi_{1,2} = \frac{2\pi\Delta_{1,2}}{\lambda}$ où $\Delta_{1,2}$ est la différence de chemin optique entre M_1B' et M_2B' soit : $\Delta_{1,2} = n\,(M_1B' - M_2B')$ [n, indice du milieu, est voisin de 1 dans l'air]. Entre les vibrations issues de M_2 et M_3, le déphasage sera $\varphi_{2,3} = \frac{2\pi\Delta_{2,3}}{\lambda}$ avec $\Delta_{2,3} = n\,(M_2B' - M_3B')$, etc., pour tous les points de la surface d'onde.

♦ La composition des amplitudes revient à l'addition des élongations des 2 vibrations à l'instant où elles arrivent au point B' considéré. Si les deux vibrations ont pour amplitudes maximales : a_1 et a_2 et si leurs élongations respectives en B' sont celles de la figure ci-dessous, l'amplitude résultante en ce point est : $\overline{A_1M_1} + \overline{A_2M_2} = a_1 + a_2 \cos \varphi$.





Diffractions par un diaphragme rectangulaire et par un diaphragme carré (Springer Verlag, Berlin).

Si $\varphi = 0$ ou un multiple de 2π, les amplitudes des ondes considérées seront en phase et s'ajouteront.
Si $\varphi = \pi$ ou un multiple impair de π, les ondes seront en opposition de phase et leurs amplitudes s'annuleront. Enfin, toutes les situations intermédiaires seront possibles. La sommation de l'ensemble conduit à une opération mathématique appelée intégration qui déborde nettement le cadre de cet exposé. Observons seulement que l'éclairement résultant dans le plan P′ dépend de la forme du contour limitant la surface d'onde, de sa dimension et de sa position — le contour est ici le diaphragme circulaire placé sur l'objectif O. L'éclairement est réparti dans la tache de diffraction circulaire décrite plus haut. Si λ est la longueur d'onde de la radiation utilisée et α l'ouverture de l'objectif, le rayon ρ de la tache centrale de diffraction est donné par la formule $\rho = \frac{1{,}22\,\lambda}{\alpha}$ ♦. Supposons que la dimension de l'image A′ de l'objet A, calculée par les méthodes classiques de l'optique géométrique, soit inférieure au diamètre de la tache centrale de diffraction. Tous les détails présents dans l'objet A auront disparu dans l'image, celle-ci étant précisément la tache de diffraction.

♦ Le rayon de la tache de diffraction donnée par un objectif de diamètre utile 5 mm formant une image dans un plan situé à 5 cm est d'environ 6,5 microns lorsqu'on éclaire en lumière verte.

On comprend que même les microscopes les plus puissants ne permettent pas de voir des objets infiniment petits. Leur limite est atteinte lorsque les dimensions de l'image deviennent de l'ordre de grandeur de la tache de diffraction donnée par l'objectif.
On a donc intérêt, lorsque l'on veut former l'image de petits objets, d'employer des objectifs de grande ouverture, qui donnent lieu à de petites taches de diffraction.

Image d'un objet, éclairages cohérent et incohérent, limite de résolution

Formons maintenant, à l'aide de l'objectif O, l'image d'un objet étendu situé dans le plan P.
Deux cas peuvent se présenter :
— L'objet est éclairé par un éclairage cohérent et se comporte alors

comme un objet cohérent dont tous les points émettent des vibrations cohérentes entre elles. En un point du plan d'observation P′, on compose les amplitudes des vibrations provenant des surfaces d'onde de tous les points de l'objet (et formant autant de taches de diffraction), puis, pour rendre compte du phénomène perçu par l'œil, on élève l'amplitude résultante au carré.

— L'objet est éclairé en éclairage incohérent et se comporte comme un objet incohérent dont tous les points émettent des vibrations incohérentes entre elles. Comme en éclairage cohérent, chaque point A de l'objet donne dans le plan P′ une tache de diffraction centrée sur son image géométrique A′. Cette fois-ci le phénomène observé résulte de l'addition des éclairements des taches de diffraction produites par les divers points de l'objet.

Le contraste de l'image obtenue en éclairage cohérent est, en moyenne, deux fois plus élevé que le contraste de l'image obtenue en éclairage incohérent. Ce contraste reste, de toute manière, inférieur — ou, à la limite, égal — à celui de l'objet.

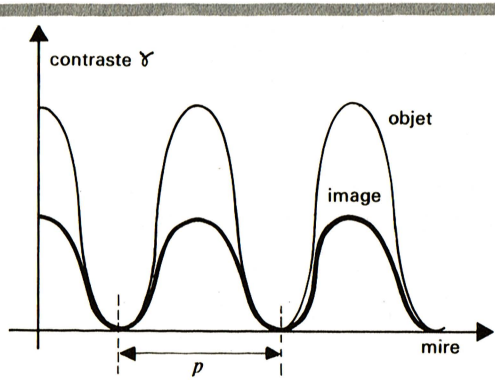
Supposons que l'objet situé dans le plan P soit formé de deux points A et A_1 dont on peut faire varier l'écartement. Pour un écartement donné, les taches de diffraction centrées sur A′ et A'_1 se recouvrent et l'on ne peut plus distinguer les images. On dit qu'on a atteint la limite de résolution de l'objectif. Cette limite est atteinte plus vite en éclairage incohérent qu'en éclairage cohérent.

FILTRAGE DES FRÉQUENCES SPATIALES

Image d'une mire sinusoïdale

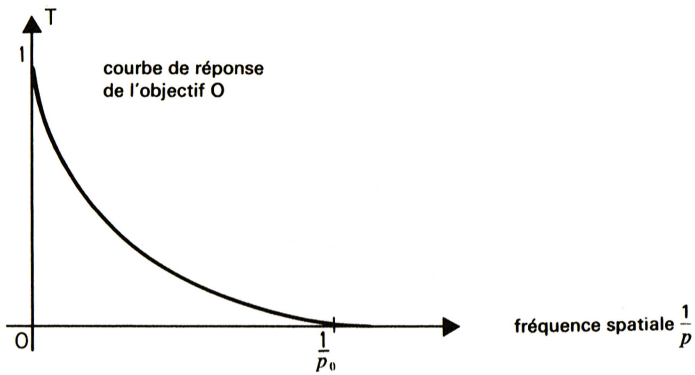
Prenons comme objet une mire composée de traits noirs et blancs régulièrement espacés suivant une période p. Les traits ont été dessinés de telle façon que leur contraste γ (fig. 19) varie d'une manière sinusoïdale. On appelle fréquence spatiale f l'inverse de la période p de la mire. L'image de cette mire sinusoïdale de fréquence $\frac{1}{p}$ sera

fig. 19



une mire de même fréquence spatiale mais dont le contraste aura diminué.
On caractérise cet affaiblissement du contraste par un nombre T entre 0 et 1. Pour un objectif donné, T ne dépend que de la fréquence spatiale de la mire, donc de l'écartement des traits. Si les traits sont infiniment écartés (l'objet est un fond blanc), le contraste ne diminue pas, T est égal à 1. A l'inverse, il y a brouillage de l'image, contraste nul, donc T = 0 lorsque la distance des traits est telle que l'on atteint la limite de résolution de l'objectif. Soit $1/p_0$ la fréquence limite ainsi définie, dite fréquence de coupure.

fig. 20



La courbe (fig. 20) donnant la variation de l'affaiblissement T en fonction de la fréquence spatiale de la mire est appelée courbe de réponse de l'objectif O. La fréquence limite $1/p_0$ $\left(\text{définie par } p_0 = \frac{\lambda}{\alpha}\right.$ où α est l'ouverture angulaire de l'objectif) caractérise l'objectif et remplace la notion de limite de résolution dont la définition n'avait rien de physique (un observateur pouvant distinguer les deux taches de diffraction alors qu'un autre les voyait déjà confondues).
On peut calculer théoriquement la courbe de réponse qui, rappelons-le, suppose l'objectif sans défauts. La comparaison de cette courbe théorique avec la courbe expérimentale permet de connaître qualitativement et quantitativement les défauts de l'objectif.

Structure d'un objet

Le mathématicien Fourier a montré que l'on pouvait décomposer n'importe quelle courbe en la somme d'un nombre plus ou moins grand — pouvant être infini — de sinusoïdes. Dans le cas qui nous intéresse, cela signifie que la répartition du contraste dans un objet peut être représentée par la somme d'un certain nombre de sinusoïdes d'amplitude et de fréquence différentes et bien déterminées.

Image d'un objet complexe

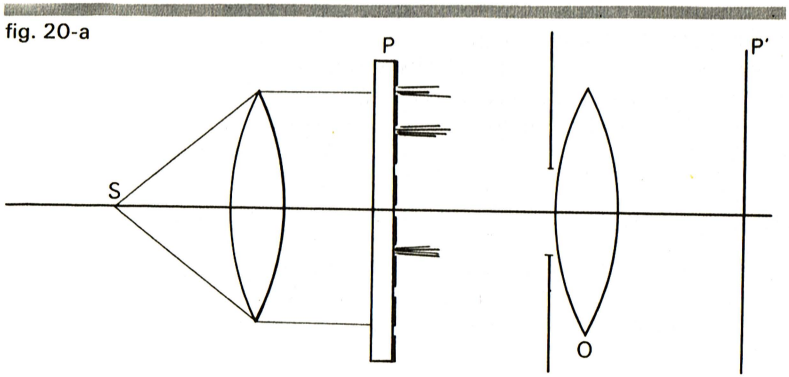
Pour obtenir l'image d'un objet présentant une variation complexe de contraste, il suffira donc de faire agir la courbe de réponse de l'objectif sur chacune des fréquences spatiales composant l'objet — en tenant compte de l'amplitude de chaque composante —, puis de recomposer les diverses sinusoïdes obtenues. On voit d'après l'allure de la courbe de réponse que les basses fréquences seront mieux transmises que les fréquences plus élevées. Autrement dit, une structure large, de grande période, sera mieux restituée qu'une structure étroite, de petite période. L'objectif aura donc tendance à supprimer les détails. Coupant les fréquences élevées, on dit qu'il se comporte comme un filtre passe-bas.

APPLICATIONS DU FILTRAGE DES FRÉQUENCES SPATIALES

Détramage d'une photographie

La plupart des photographies reproduites dans les journaux sont constituées par une trame. Cette trame est formée de points noirs plus ou moins gros suivant que les régions reproduites sont foncées ou claires. Il est intéressant de pouvoir supprimer les points correspondant aux zones claires ou moyennes où ils apparaissent souvent d'une manière gênante.
Pour cela, on éclaire la photographie en éclairage cohérent (fig. 20-a) et on en forme l'image à travers un objectif dont la courbe de réponse est telle que les fréquences correspondant aux points des zones claires soient au-delà de la fréquence de coupure, donc ne soient pas transmises. La fréquence des bandes sombres, inférieure à la fréquence de coupure, est transmise et l'on obtient une photo détramée avec des bandes sombres plus ou moins floues se détachant sur un fond gris. Mais comment agir sur la fréquence de coupure de l'objectif pour l'amener à la valeur souhaitée? La fréquence de coupure est liée au pouvoir de résolution, dépendant lui-même de la dimension

fig. 20-a

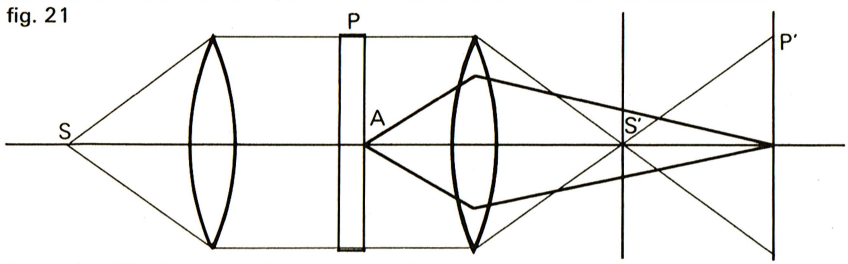


de la tache de diffraction. Plus l'objectif est ouvert, plus le rayon de la tache de diffraction est petit et plus la fréquence de coupure est élevée. C'est donc essentiellement en agissant sur le diamètre de l'objectif que l'on ajuste la fréquence de coupure.

Correction du flou d'une photographie

C'est à un besoin inverse qu'il faut, cette fois-ci, répondre. Lorsqu'une photographie est floue, par suite, par exemple, d'un défaut de mise au point, il faut faire apparaître les contours avec plus de netteté. donc augmenter le contraste des discontinuités. Or, les discontinuités correspondent à des termes de fréquence élevée. Il faut donc réduire la transmission des basses fréquences, de façon à valoriser les termes de fréquence élevée. Pour cela, on utilise le dispositif de la figure 21.

fig. 21



Le négatif photographique plan P est placé entre deux objectifs. L'ensemble des deux objectifs forme une image S′ de la source ponctuelle S, tandis que le deuxième objectif donne une image du négatif P dans le plan P′. Le système d'éclairage de P en fait un objet cohérent. Les détails fins de la photo vont donner une tache de diffraction large, donc vont diffracter la lumière dans des directions faisant des angles élevés avec l'axe. Par contre, les régions correspondant à des basses fréquences vont diffracter la lumière suivant un pinceau très resserré autour de l'axe du système. Si l'on place en S′, sur l'image de la source S, une petite lame absorbante, elle va intercepter et atténuer le faisceau correspondant aux termes de basse fréquence et n'agira pratiquement pas sur le pinceau très large des hautes fréquences. Le but est atteint. Globalement, l'image est moins lumineuse, mais les termes de haute fréquence y ont été valorisés, au détriment des termes de basse fréquence, et les contours apparaissent plus nettement.

Le contraste de phase ♦

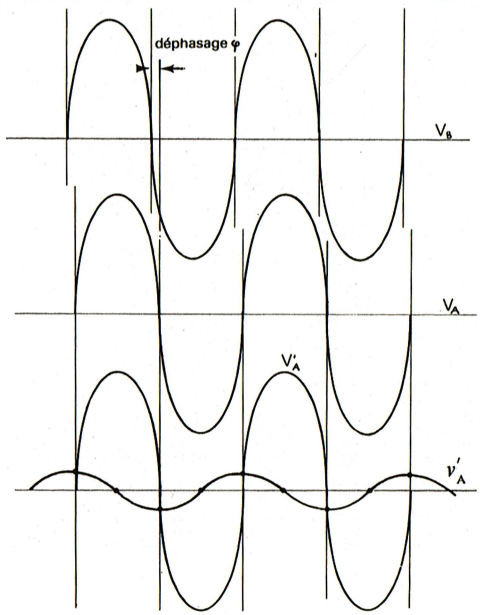
Un objet n'est visible que lorsqu'il se distingue du fond sur lequel on l'observe, soit par son éclairement, soit par sa couleur. Dans la plupart des préparations microscopiques, les corps à observer

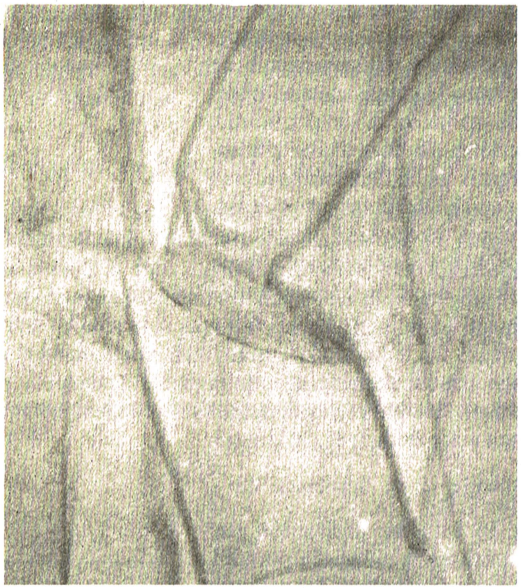
♦ M. Françon : *le Microscope à contraste de phase et le microscope interférentiel* (C.N.R.S., Paris, 1954).

(bactérie, cellule...) sont transparents et sans coloration. Pour les distinguer, les biologistes emploient des colorants qui, malheureusement, tuent les corps vivants. La méthode du contraste de phase, en permettant d'observer les différences de phase entre l'objet et le milieu où il se trouve, a apporté une solution à ce problème. Reprenons le montage utilisé pour la correction du flou d'une photographie (fig. 21). Mettons, à la place du négatif photo, la préparation (d'indice n), le détail transparent à observer (d'indice n' et d'épaisseur e) se trouvant en A. Ce détail n'étant pas absorbant, les vibrations V_A et V_B (fig. 22) qui ont traversé le détail et le fond ont même amplitude, mais présentent une différence de phase φ proportionnelle à la différence des chemins optiques $\Delta = (n' - n)\, e$, soit $\varphi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda}$.

On montre que V_A peut être décomposée en la somme de deux vibrations : V'_A identique à V_B représentant la lumière qui aurait traversé la préparation en A s'il n'y avait pas eu le détail; v'_A d'amplitude proportionnelle au déphasage très faible φ et déphasée de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à V_B (ou V'_A) représentant la lumière diffractée par l'objet A dans un cône très large. On observera en A', dans le plan P', la superposition des vibrations V'_A et v'_A en quadrature. La théorie et l'expérience montrent qu'elles se comportent comme si elles étaient indépendantes.

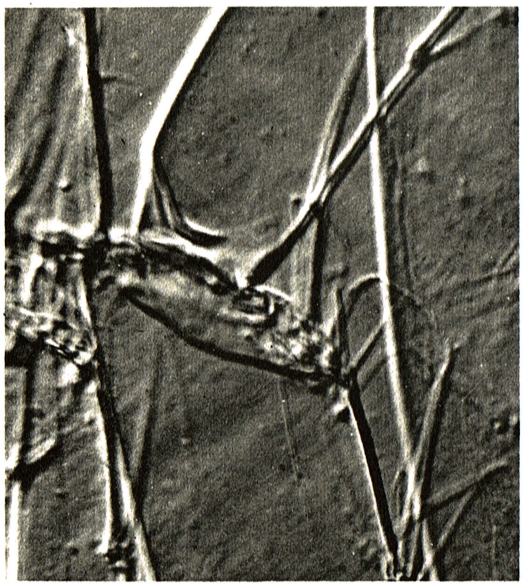
fig. 22





Préparation microscopique observée au microscope ordinaire.

Préparation microscopique observée au microscope ordinaire en éclairage cohérent avec défaut de mise au point.



Préparation microscopique observée au microscope à contraste de phase.

Préparation microscopique observée au microscope à contraste de phase avec fond noir (Springer Verlag, Berlin).

L'éclairement en A′ est donc le même que celui du reste de la préparation (égal à 1, si l'amplitude de V'_A et V_B est unitaire), l'objet A reste invisible.
Plaçons en S′, image de la source S, une lame — dite lame de phase — de petites dimensions, introduisant un déphasage de $\frac{\pi}{2}$. Les rayons passant en S′ correspondent à la lumière directe qui a traversé la préparation sans être diffractée — ou dans un cône d'angle très faible — donc aux vibrations V_B et V'_A. Les rayons correspondant à la vibration v'_A, diffractée par le détail A, étant largement étalés dans le plan de S′, ne sont pratiquement pas affectés par la présence de la lame de phase. V'_A et v'_A se trouvent alors en phase et ne sont plus indépendantes, ce sont donc leurs amplitudes qu'il faut additionner en A′. L'éclairement observé est alors de la forme : $(1 + \varphi)^2 = 1 + \varphi^2 + 2\varphi$. φ^2 est négligeable devant 1, mais 2φ ne l'est pas, l'éclairement en A′ est différent de celui du reste de la préparation et l'objet A devient visible.

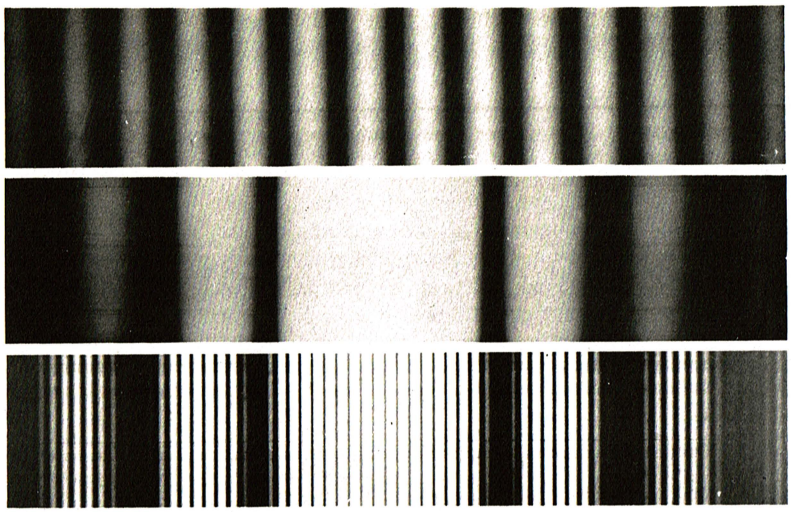
Le contraste de phase permet une meilleure observation des cellules

On peut même rendre la lame de phase absorbante de façon à valoriser l'objet de petite dimension à observer, au détriment du reste de la préparation. On peut même utiliser une lame de phase totalement opaque. Cette technique, dite du fond noir, permet de voir l'objet transparent sur le fond noir de la préparation. L'éclairement en A′ est alors $(0 + \varphi)^2 = \varphi^2$, donc extrêmement faible, mais le contraste est maximal et égal à 1. Cette technique n'est applicable qu'à des objets présentant un déphasage φ non négligeable, donc une épaisseur ou une différence d'indice déjà appréciable. Le contraste de phase a permis aux biologistes d'obtenir des renseignements précieux sur l'évolution du noyau des cellules cancéreuses. Le contraste de phase est également appliqué à des contrôles optiques de haute précision ainsi qu'à l'étude de l'état de surface de cristaux. C'est ainsi que l'on a pu mettre en évidence des défauts de surface de quelques angströms, invisibles par d'autres procédés.

Les réseaux ♦

Nous avons vu page 370 une méthode permettant d'isoler une radiation quasi monochromatique, dans une lumière donnée, à l'aide d'un prisme. Une autre méthode, plus répandue, est basée sur les interférences et la diffraction. Elle fait appel à un réseau : lame de verre de très haute qualité optique, rigoureusement plane, sur laquelle ont été tracés des sillons régulièrement espacés. Si ce réseau plan est éclairé en lumière monochromatique, par transmission, en éclairage cohérent, les divers traits, diffractant la lumière, vont se comporter comme des sources cohérentes. Le phénomène observé

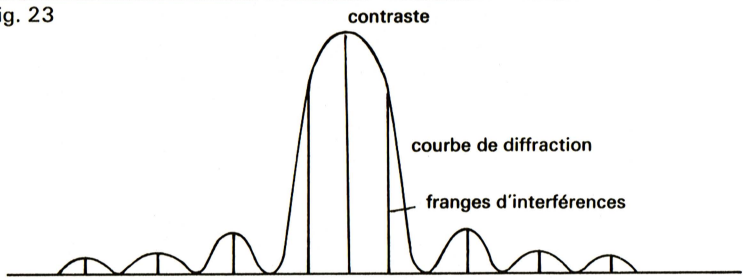
♦ Pour une étude simple, avec quelques développements mathématiques, consulter : M. Françon : *Diffraction, cohérence en optique* (Gauthier-Villars, Paris, 1964).



De haut en bas :
— Franges d'Young produites par deux fentes.
— Diffraction par une fente.
— Phénomène produit par diffraction et interférences à deux fentes
(Springer Verlag, Berlin).

dans le plan focal P′ d'une lentille résultera du système d'interférences multiples entre les vibrations issues des n traits du réseau. Ce système est modulé en éclairement par la courbe de diffraction d'une fente fine (fig. 23). On observe en effet des raies très fines, d'autant mieux séparées que le nombre de traits par millimètre est plus élevé. Ces lignes correspondent aux maximums d'interférences entre n sources. L'éclairement des raies décroît à partir du centre du phénomène ; il varie en fonction de la répartition de l'éclairement dans la tache de diffraction donnée par une fente.

fig. 23



Éclairons le réseau avec une source émettant, en plus de la radiation utilisée ci-dessus, diverses radiations de longueurs d'onde différentes. Autour des maximums précédents apparaissent d'autres raies correspondant aux nouvelles radiations introduites. Chaque groupement de raies correspondant à des longueurs d'onde différentes constitue un spectre. Il y a autant de spectres que de maximums d'interférences observés. L'énergie contenue dans chaque spectre est donc inférieure

à celle contenue dans le spectre unique donné par le prisme. Cet inconvénient est minimisé dans les réseaux modernes utilisés dans le blaze. De tels réseaux, gravés dans une plaque métallique, sont utilisés par réflexion. La surface réfléchissante se présente sous forme de facettes métalliques en marches d'escalier (fig. 24), d'une profondeur de quelques microns. Les dimensions des marches sont calculées de telle façon que l'énergie se répartisse pratiquement dans un seul spectre. Les valeurs des éclairements relatifs aux autres spectres correspondent à peu près aux minimums de la courbe de diffraction. Les pouvoirs séparateur et dispersif de tels réseaux sont nettement supérieurs à ceux du prisme.

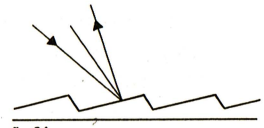


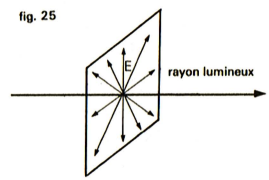
fig. 24

POLARISATION

Les phénomènes d'interférences et de diffraction que nous venons d'étudier brièvement ne faisaient appel qu'à deux hypothèses fondamentales :
— la lumière est une grandeur de nature ondulatoire ;
— l'éclairement observé par l'œil est proportionnel au carré de l'amplitude de cette grandeur.
Nous avons vu que cette grandeur est le champ électrique représenté dans un milieu isotrope par un vecteur perpendiculaire au rayon lumineux dont l'amplitude varie d'une manière sinusoïdale dans le temps ou l'espace.
Les phénomènes de polarisation nécessitent une connaissance plus approfondie du vecteur champ électrique, donc du phénomène d'émission de la lumière par une source.

La lumière naturelle

Nous avons vu (page 372) que chaque atome d'une source monochromatique se comporte comme un oscillateur émettant, à un instant t, une vibration sans aucun rapport de direction, d'amplitude ni de phase avec la vibration émise à l'instant précédent. A un instant t, on ne peut donc parler de direction, d'amplitude ni de phase du champ électrique E. L'œil et même les récepteurs les plus rapides, sensibles à l'énergie lumineuse (donc au carré de l'amplitude de E) vont opérer une moyenne dans le temps du carré de l'amplitude de E. C'est cette amplitude moyenne A_m qui caractérise le phénomène lumineux. Par contre, la direction du vecteur ♦ E reste aléatoire. Toutes les directions sont également probables. Le phénomène lumineux est alors représenté par une infinité de vecteurs E d'amplitude A_m (fig. 25), d'orientation quelconque dans le plan d'onde. On dit que la source rayonne de la lumière naturelle. On démontre par un raisonnement mathématique simple qu'une telle vibration lumineuse peut être décomposée en deux vibrations X et Y perpendiculaires,

fig. 25


♦ Voir Aperçu mathématique, page 17.

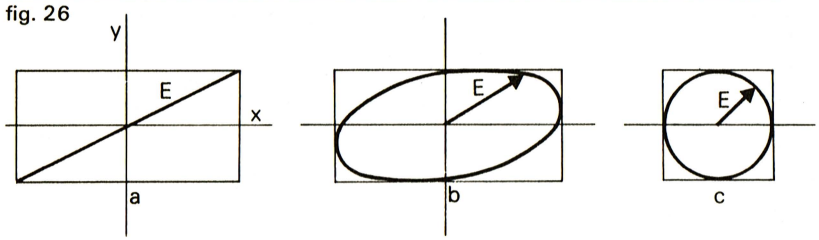
d'orientation arbitraire, totalement incohérentes entre elles. Leur amplitude et leur phase changent, sans liaison entre elles, plusieurs milliards de fois par seconde. La moyenne dans le temps du carré de l'amplitude de chaque vibration étant égale à $\frac{(A_m)^2}{2}$, on retrouve bien l'énergie de la vibration initiale : $(A_m)^2 = \frac{(A_m)^2}{2} + \frac{(A_m)^2}{2}$.

Le problème de la polarisation est de savoir si l'on peut rendre ces deux vibrations perpendiculaires cohérentes entre elles, bien qu'incohérentes individuellement.

La lumière polarisée

Si l'on réussit à introduire une différence de phase constante entre X et Y, ces deux vibrations seront cohérentes entre elles. La vibration résultante E dépendra du déphasage φ introduit, ainsi que de l'atténuation apportée à chacune des vibrations X et Y (fig. 26) :

fig. 26



— Si $\varphi = 0$ (fig. 26 *a*) : E sera un vecteur fixe dont l'orientation dépendra des atténuations apportées à X ou Y. L'onde sera dite polarisée rectilignement. A la limite, on pourra, en atténuant totalement l'une ou l'autre des vibrations, polariser l'onde lumineuse suivant X ou Y.

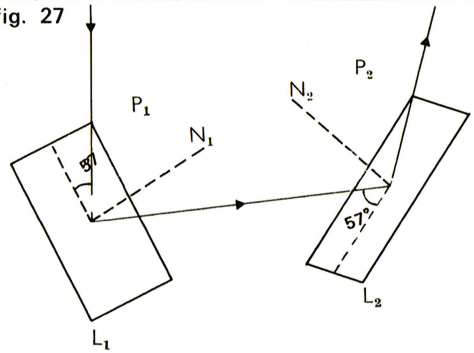
— Si φ est constante et différente de O : le vecteur E décrira une ellipse dont l'orientation et le rapport des axes dépendront des valeurs de φ et des atténuations de X et Y. L'onde sera polarisée elliptiquement (fig. 26 *b*).

— Pour une égale atténuation de X et Y et un déphasage de $\frac{\pi}{2}$, E décrira un cercle, la polarisation sera circulaire (fig. 26 *c*).

L'expérience de Malus

Envoyons un faisceau de rayons parallèles sur une lame de verre L_1 (fig. 27) sous une incidence d'environ 57°. Faisons subir au faisceau réfléchi sur L_1 une deuxième réflexion sur une lame L_2,

fig. 27



P_1, P_2 : plans d'incidence
N_1, N_2 : normales perpendiculaires aux lames
L_1, et L_2.

sous la même incidence, mais de telle façon que les plans d'incidence sur L_1 et L_2 soient perpendiculaires. Après réflexion sur L_2 la lumière a été absorbée.
L'explication est simple, si nous décomposons, à chaque réflexion, la vibration lumineuse E en deux vibrations orthogonales $E_{//}$ (contenue dans le plan d'incidence) et $E_{\perp}$ (perpendiculaire au plan d'incidence). A peu près toutes les substances possèdent la propriété de réfléchir inégalement ces deux composantes $E_{//}$ et $E_{\perp}$. La valeur de l'atténuation dépend essentiellement de l'angle d'incidence et de l'indice de la substance considérée. Pour le verre, sous une incidence de 57°, la composante $E_{//}$ est totalement absorbée, seule se réfléchit la composante $E_{\perp}$. Nous nous trouvons dans un cas de polarisation rectiligne, le vecteur E étant perpendiculaire au plan d'incidence après réflexion sur la lame L_1.
En arrivant sur L_2, le vecteur E doit être à nouveau décomposé suivant les directions parallèles et perpendiculaires au nouveau plan d'incidence P_2. Ces directions sont perpendiculaires aux précédentes, donc E se trouve parallèle à P_2 et, de ce fait, est totalement absorbé. Si l'on fait tourner la lame L_2 en maintenant l'incidence à 57°, l'amplitude de la lumière réfléchie varie d'une manière sinusoïdale. Elle est nulle lorsque les plans d'incidence P_1 et P_2 sont perpendiculaires, et maximale lorsqu'ils sont parallèles.

Le polaroïd

La même expérience peut être réalisée avec deux polaroïds. Un polaroïd se présente sous la forme d'une lame en matière plastique dans laquelle ont été noyés des monocristaux dichroïques ♦. Ces cristaux possèdent la propriété d'absorber fortement une des composantes de la vibration lumineuse. Tous les cristaux ayant été orientés dans la même direction, la lame atténuera quasi totalement l'une des composantes X ou Y et laissera passer l'autre.

♦ Phénomène voisin de la biréfringence. Un cristal dichroïque (tourmaline : borosilicate d'aluminium) dédouble le rayon incident en 2 rayons, ordinaire et extraordinaire, mais les absorbe également. Une lame de 1 mm de tourmaline absorbe complètement le rayon ordinaire, ne laissant subsister que le rayon extraordinaire.

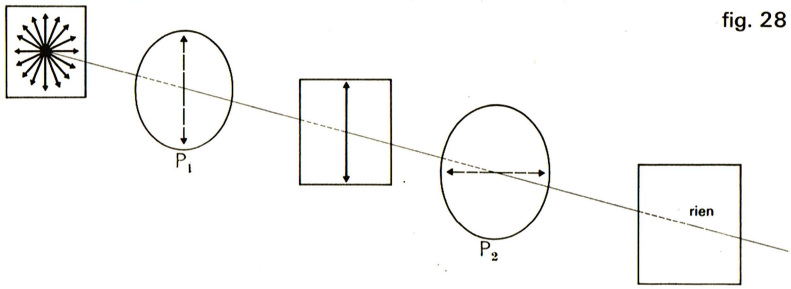


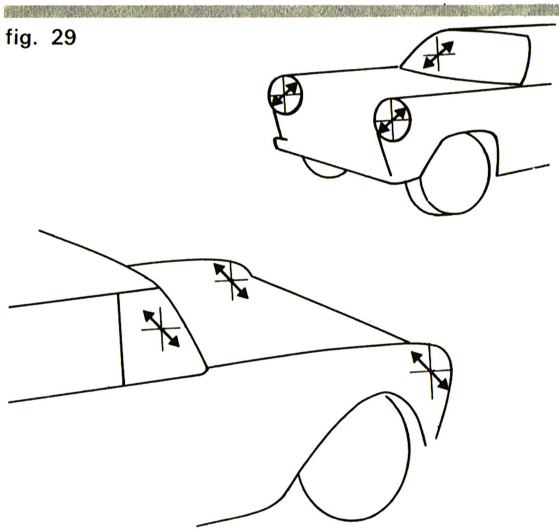
fig. 28

En disposant l'un à la suite de l'autre deux tels polariseurs P_1 et P_2 (fig. 28) et en en faisant tourner un dans son plan, on pourra faire varier l'énergie lumineuse transmise de la même manière que dans l'expérience de Malus.

Application

Comment supprimer l'éblouissement du conducteur par les phares de la voiture venant en sens inverse ? Il suffit de recouvrir le pare-brise et les phares de chaque voiture d'une feuille de polaroïd et d'orienter ces polariseurs de façon à ne laisser passer que les vibrations dont la direction est inclinée à 45° de la gauche vers la droite (fig. 29). La lumière émise par les phares d'une voiture sera polarisée parallèlement à la direction du polariseur du pare-brise de cette voiture, le conducteur verra donc la route éclairée par ses phares. Par contre, la lumière émise par les phares d'une voiture venant

fig. 29



en sens inverse sera polarisée perpendiculairement à la direction du polaroïd du pare-brise de la première voiture : la lumière ne passera donc pas, le chauffeur ne sera pas ébloui. Parmi de nombreux inconvénients, le coût élevé d'un tel système empêche sa commercialisation.

Biréfringence et double réfraction — milieux anisotropes

Dès le XVIIe siècle, Erasme Bartholin avait découvert que le spath dédoublait les images. Si l'on pose un tel cristal — convenablement taillé, sous forme d'une lame à faces parallèles — sur une feuille percée d'un trou par où passe la lumière, on observe deux points lumineux correspondant à deux trajets à l'intérieur du spath (fig. 30). Faisons tourner le cristal autour d'un axe perpendiculaire à la feuille : on constate que l'un des points reste fixe tandis que l'autre décrit un cercle autour du premier. Le rayon fixe obéit aux lois de Descartes ♦, on l'appelle rayon ordinaire (*o*). L'autre, semblant obéir à des lois différentes, est appelé rayon extraordinaire (*e*). Nous sommes en présence d'un phénomène de double réfraction. Si l'on examine maintenant l'état de polarisation des faisceaux à l'aide d'un polaroïd, on s'aperçoit qu'ils sont polarisés rectilignement et que leurs directions de polarisation sont perpendiculaires.

♦ Voir page 368.

De telles propriétés caractérisent un milieu anisotrope, c'est-à-dire un milieu ne se comportant pas de la même façon dans toutes les directions. Les propriétés d'anisotropie sont liées à la structure atomique du milieu. Les corps anisotropes seront donc souvent des cristaux (rubis, saphir, carbonate de calcium, glace...).

Notons simplement que, dans ces corps, le rayon lumineux, porteur de l'énergie lumineuse, n'est plus perpendiculaire au plan d'onde (fig. 31). Le champ électrique E n'est plus situé dans le plan d'onde, mais reste perpendiculaire au rayon lumineux.

Examinons le cas le plus répandu, celui des milieux anisotropes uniaxes (comme le spath) qui possèdent un axe de symétrie cristal-

fig. 30

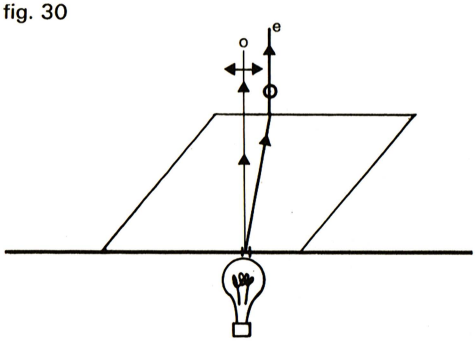


fig. 31

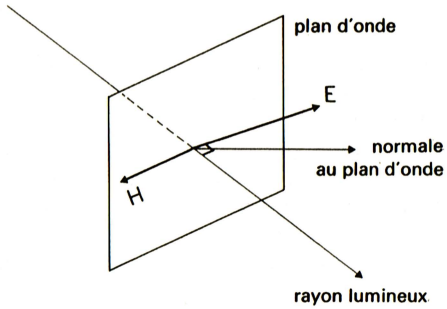
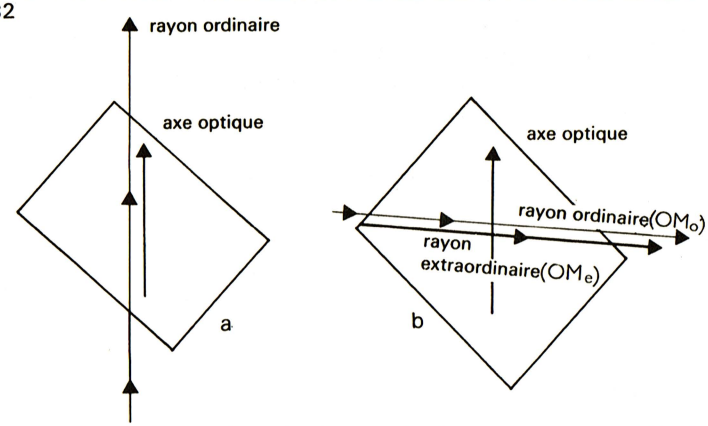


fig. 32

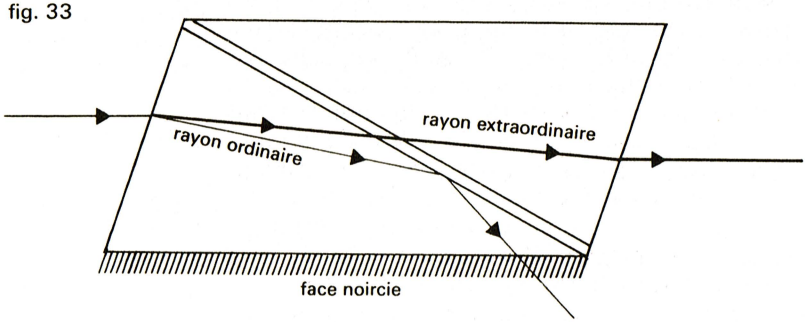


line et optique. Si le plan de l'onde incidente est perpendiculaire à cet axe, appelé axe optique, l'onde se propage en suivant l'axe optique (fig. 32 *a*), comme dans un milieu isotrope d'indice n_0. Si, par contre (fig. 32 *b*), le plan d'onde est parallèle à l'axe optique, la vibration lumineuse se comporte comme si elle était partagée en deux composantes. L'une, OM_0, polarisée perpendiculairement à l'axe optique, se propage dans le cristal à la vitesse v_0 associée à l'indice ordinaire n_0 $\left(n_0 = \frac{c}{v_0}\right)$. L'autre, OM_e, polarisée parallèlement à l'axe optique, se propage à la vitesse v_e associée à l'indice dit « extraordinaire » n_e $\left(n_e = \frac{c}{v_e}\right)$. Le plan d'onde se propage alors perpendiculairement à l'axe optique et les deux vibrations polarisées perpendiculairement restent confondues.
Si le plan d'onde occupe une position intermédiaire, les vibrations ordinaires et extraordinaires ne suivent pas le même trajet et l'on obtient le phénomène de biréfringence observé avec le cristal de spath.

Le prisme de Nicol

A l'aide d'un cristal de spath suffisamment long, on peut réaliser un excellent polariseur. On scie un tel cristal suivant un plan diagonal bien déterminé et on le recolle à l'aide d'une mince couche de baume du Canada (fig. 33), colle optique transparente d'indice inférieur à celui du spath. Dans ces conditions, le rayon ordinaire tombe sur la face collée suivant un angle supérieur à l'angle de réfraction limite. Il se réfléchit donc et est absorbé par la face inférieure du cristal qui est noircie. Par contre, le rayon extraordinaire tombe sur la face collée suivant un angle inférieur à l'angle de réfraction limite, donc

fig. 33



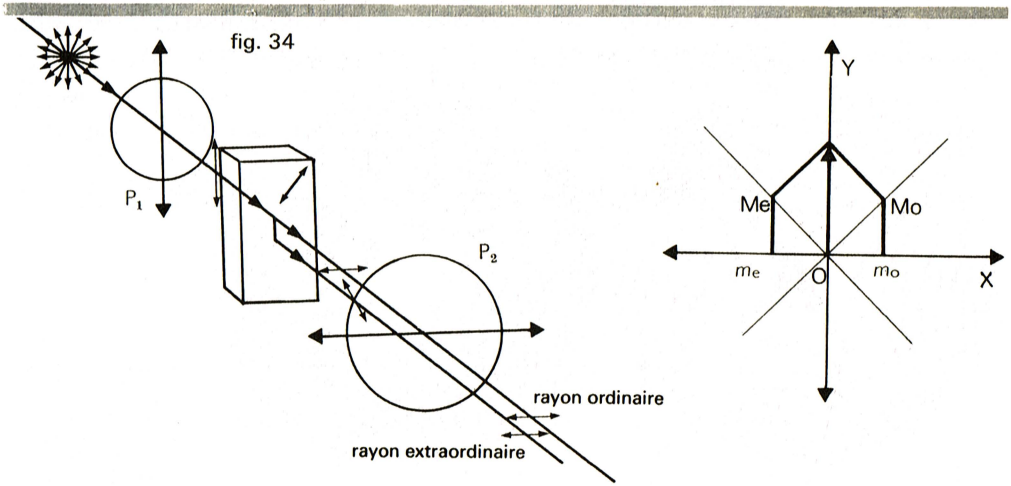
se réfracte et sort du cristal. Ce rayon étant polarisé rectilignement, on a réalisé un polariseur à l'aide de ce prisme taillé suivant la méthode indiquée en 1828 par Nicol.

Interférences en lumière polarisée

Nous avons examiné les propriétés optiques du cristal de spath, mais nous ne nous sommes pas intéressés à la cohérence des deux vibrations ordinaire et extraordinaire. Provenant d'une même vibration, elles sont cohérentes entre elles. Sont-elles en phase ? Ayant suivi des trajets optiques différents à des vitesses différentes, elles ont acquis un déphasage proportionnel à la différence des chemins optiques parcourus : $\Delta = n'_e\, l_e - n'_0\, l_0$ ♦. Or, ces deux ondes n'interfèrent pas. Elles sont, en effet, polarisées rectilignement dans des directions perpendiculaires et se comportent comme si elles étaient indépendantes. Le montage suivant (fig. 34) permet pourtant de les faire interférer : le polariseur P_1 est orienté de façon à ne

♦ Où n'_0 et n'_e sont les indices ordinaire et extraordinaire du cristal pour les directions de propagation considérées, l_0 et l_e les longueurs parcourues par les deux ondes dans le cristal.

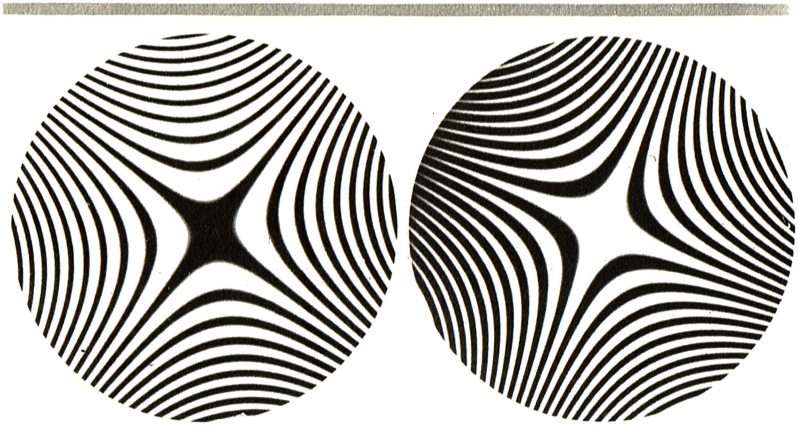
fig. 34



laisser passer que les vibrations verticales (suivant OY), le polariseur P_2 les vibrations horizontales (suivant OX). Lorsqu'ils sont seuls, la lumière n'est pas transmise. Entre P_1 et P_2, on place une lame biréfringente dont l'axe optique est perpendiculaire aux rayons lumineux et incliné à 45° sur les axes OX et OY. La vibration verticale issue de P_1 est séparée en deux vibrations ordinaire OM_o et extraordinaire OM_e respectivement perpendiculaire et parallèle à l'axe optique de la lame et donc à 45° de la direction OX transmise par le polariseur P_2. La résultante de ces deux vibrations est une vibration elliptique, mais ce sont les projections de ces deux vibrations sur OX qui seront transmises par P_2. Les deux vibrations projectées Om_0 et Om_e sont donc parallèles, cohérentes entre elles et présentent le déphasage $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_0 - n_e)\, e$ ♦, car $l_0 = l_e = e$ (épaisseur de la lame). Il va donc y avoir interférence. L'amplitude du phénomène observé résultera de la différence des amplitudes à la sortie de P_2, car les vecteurs ♦ Om_0 et Om_e sont opposés. La lame biréfringente sera dite :
1/4 d'onde, si $(n_0 - n_e)\, e = \lambda/4$, c'est-à-dire si $\varphi = \pi/2$;
1/2 onde, si $(n_0 - n_e)\, e = \lambda/2$, soit $\varphi = \pi$; il y aura alors un maximum de lumière pour la radiation considérée (car faire la différence de deux ondes en opposition de phase revient à les ajouter) ;
onde, si $(n_0 - n_e)\, e = \lambda$, soit $\varphi = 2\pi$; il y aura alors extinction (car la différence de deux ondes en phase est nulle).
En lumière blanche, on obtient ainsi les teintes des lames minces qui renseignent sur le déphasage, donc sur l'épaisseur ou la différence des indices, de la lame biréfringente. Dans cet exemple, nous avons supposé que l'incidence sur la lame était normale, donc que l'égalité $l_0 = l_e = e$ était réalisée. Si l'inclinaison des rayons incidents varie, l_0, l_e et le déphasage φ vont également varier. Les phénomènes colorés que l'on observera seront donc différents suivant que le

♦ n_0 et n_e sont alors les indices principaux de la lame, donc, pour une propagation perpendiculaire à l'axe.

♦ Voir Aperçu mathématique, page 17.



Lame de quartz taillée perpendiculairement à l'axe optique, observée entre des polariseurs croisés et des polariseurs parallèles (Springer Verlag, Berlin).

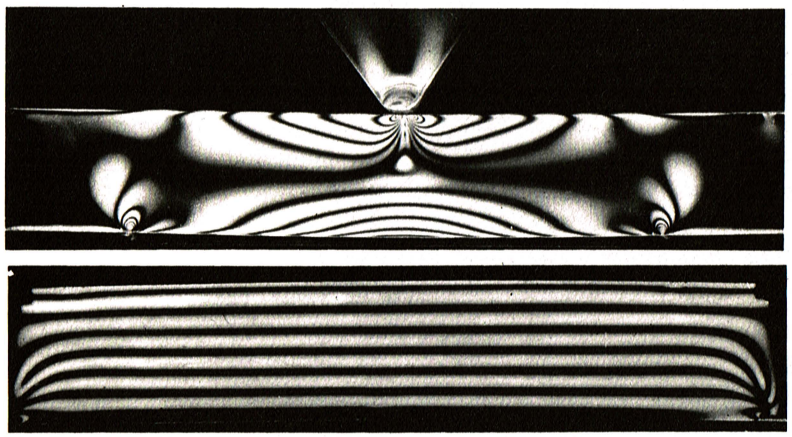
faisceau d'éclairage est parallèle ou convergent. Ces phénomènes, caractéristiques des groupements cristallins, fournissent des renseignements précieux sur la structure du cristal étudié.

La photoélasticimétrie

Lorsqu'on soumet un matériau homogène et isotrope à certaines contraintes (compression, étirement...), il se déforme et devient anisotrope ♦. S'il était précédemment transparent, on constate qu'il est devenu biréfringent. Si nous le mettons à la place de la lame biréfringente dans le montage interférentiel précédent, les franges d'interférences que l'on observera fourniront une carte des tensions internes subies par le matériau.

♦ Voir page 399.

Cette technique est utilisée en résistance des matériaux. Par exemple, avant de construire un pont, on réalise une maquette, à échelle réduite, en matière plastique. On soumet cette maquette à des charges proportionnelles à celles qui seront supportées par le pont et on l'examine par la méthode précédente. On peut ainsi localiser les zones soumises à de fortes contraintes et les renforcer lors de la construction.



Photoélasticimétrie (de haut en bas) : poutre sur 2 appuis chargée en son milieu (de charge moyenne) ; poutre fléchie sans charge (Springer Verlag, Berlin).

Effet Kerr : modulation de la lumière

Certains corps normalement isotropes peuvent aussi être rendus biréfringents par application d'un champ électrique intense. C'est le cas du sulfure de carbone. Une différence de potentiel de l'ordre de 20 000 volts est appliquée entre deux électrodes trempant dans un bac rempli de sulfure de carbone. Le champ électrique produit dans le liquide une biréfringence proportionnelle au carré de son

intensité. Cette biréfringence porte le nom d'effet Kerr. Si l'on place ce bac entre deux polariseurs croisés :
— en l'absence de champ électrique, le milieu est isotrope, donc inactif, la lumière ne passe pas entre les polariseurs croisés ;
— lorsque le champ est appliqué, le milieu se comporte comme un cristal uniaxe et fait donc apparaître des directions de vibrations parallèles et perpendiculaires à son axe optique ; il y a réapparition de la lumière.
En faisant varier la tension à une fréquence élevée, on réalise un modulateur de lumière ou un obturateur périodique ultra-rapide. C'est ainsi qu'on a pu réaliser une mesure extrêmement précise de la vitesse de la lumière, la durée d'ouverture pouvant être réduite à quelques millièmes de microseconde.

La polarisation rotatoire

Envoyons dans une solution de sucre un faisceau de lumière polarisée rectilignement. A la sortie, on constate que le plan de polarisation a tourné d'un angle proportionnel à l'épaisseur traversée et à la concentration en sucre. On se trouve en présence d'un phénomène de polarisation rotatoire. Pasteur, en 1856, montra qu'un défaut de symétrie dans un cristal (il s'agissait de l'acide tartrique) entraînait une telle rotation du plan de polarisation de la lumière. La stéréochimie ♦ moderne est basée sur cette observation. Des corps organiques ayant la même formule chimique ont des propriétés physiques ou chimiques différentes, basées sur des symétries cristallines différentes. On observe, en solution, que ces substances sont douées de pouvoirs rotatoires différents, ce qui permet de les identifier.

♦ Théorie chimique qui conduit à la représentation dans l'espace, et non dans un plan, des édifices moléculaires.

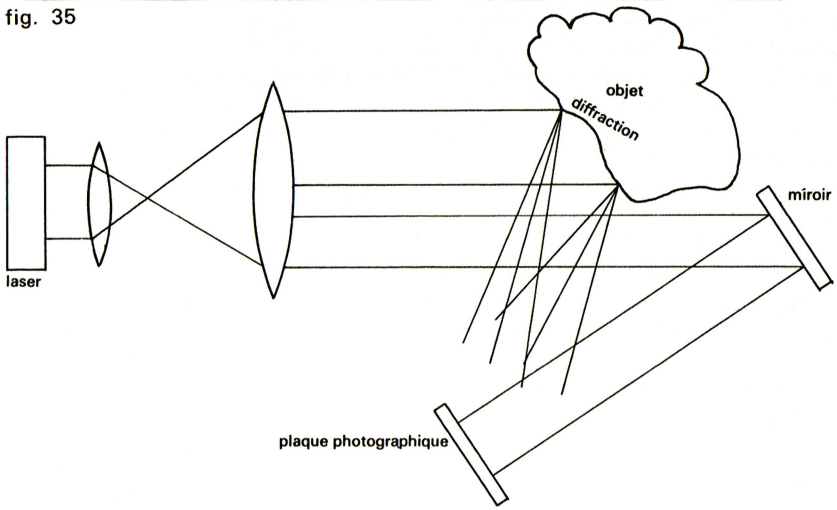
LES DÉCOUVERTES RÉCENTES

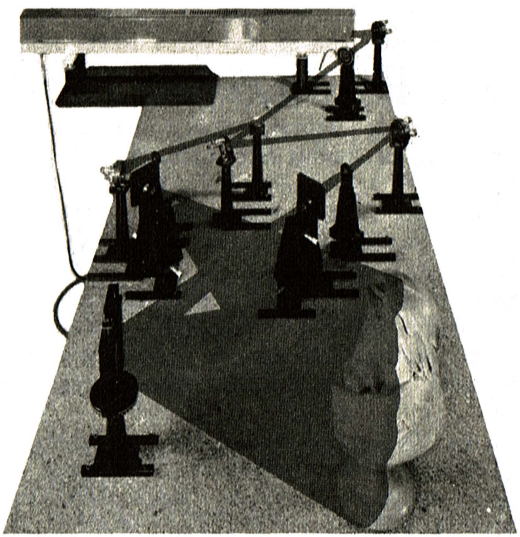
Depuis 1960, le laser a apporté un souffle nouveau à l'optique. Les domaines que nous avons abordés jusqu'ici ont connu un développement inespéré grâce à la puissance et à la cohérence du faisceau laser. D'autres domaines, enfin, n'auraient pu naître sans le faisceau laser. En voici trois parmi les principaux.

L'holographie

Il s'agit d'une méthode de photographie permettant de restituer le relief d'un objet. Ce n'est pas une illusion d'optique. L'observateur peut, en se déplaçant, voir sur l'image des détails qui lui sont cachés par les objets du premier plan. Dans une photographie classique, on enregistre, sur la plaque photographique, l'énergie lumineuse réfléchie par l'objet.
Si l'objet est éclairé en éclairage cohérent, chacun de ses points va

fig. 35





Montage holographique. En haut, le laser d'éclairage. On distingue les 2 faisceaux : éclairage et référence, qui s'ajoutent sur la plaque photographique (C.G.E., laboratoires de Marcoussis).

diffracter des ondes cohérentes dont le déphasage caractérise le relief de l'objet. Comment rendre ces déphasages visibles? On éclaire l'objet à photographier (fig. 35) à l'aide d'un faisceau laser et l'on recueille sur la plaque photographique le faisceau diffracté par l'objet ainsi qu'une partie du faisceau laser d'éclairage. Ces faisceaux, étant cohérents, vont interférer. On enregistre alors, sur la plaque photographique, les interférences caractérisant l'amplitude et la phase de chaque point de l'objet.

Après développement, l'hologramme ne ressemble en rien à une photo traditionnelle ; il se présente comme un rectangle grisâtre, moiré. Pour voir une image, il faut éclairer la plaque avec un faisceau laser analogue au faisceau utilisé pour la prise de vue. On verra alors une image virtuelle en trois dimensions. L'œil devra accommoder selon qu'il observe le premier plan ou l'arrière-plan. Chaque point de l'hologramme porte tous les renseignements sur l'objet. On peut le vérifier en brisant la plaque en petits morceaux : chaque morceau éclairé redonne l'image dans sa totalité.
Dès 1948, D. Gabor avait prévu la possibilité de réaliser des hologrammes, mais il a fallu attendre 1965 et la commercialisation du laser pour que Leith ♦ et Upatnicks les réalisent. En 1967, Stroke et Labeyrie ♦ réalisaient un hologramme visible à la lumière du jour. Le laser ne devenait indispensable qu'à l'enregistrement.
On est actuellement sur la voie de l'hologramme en couleur, visible en lumière naturelle.

♦ Leith, Upatnicks, Stroke, chercheurs à l'Institut de science et de technologie de l'Université de Michigan (U.S.A.).

♦ Labeyrie : jeune chercheur français, ingénieur de l'École supérieure d'optique. A travaillé à l'Université de Michigan avec le Professeur Stroke.

L'optique non linéaire

Lorsqu'une onde lumineuse pénètre dans la matière, le champ électrique E excite les électrons qui se mettent à vibrer faiblement autour de leur position d'équilibre. L'onde ainsi engendrée dans la matière a une amplitude proportionnelle au champ E et même fréquence. On observe alors les phénomènes que nous avons décrits jusqu'ici, qui, en référence au champ électrique, sont dits linéaires ou du premier ordre.
Lorsqu'on dispose d'énergie, donc de champs électriques beaucoup plus intenses —, ce qui se produit avec le laser —, on voit apparaître des phénomènes nouveaux. Ces phénomènes, dits non linéaires ou de second ordre, existaient aux faibles énergies, mais étaient masqués par les phénomènes linéaires. Les électrons ne vibrent plus seulement proportionnellement au champ électrique et à sa fréquence, mais aussi proportionnellement au carré du champ électrique et à une fréquence double.
L'expérience réalisée en 1961 par Franken est caractéristique. En irradiant un cristal de quartz avec le faisceau d'un laser à rubis émettant une radiation rouge de longueur d'onde 0,6943 micron, on obtient, à la sortie du cristal :
— l'onde rouge, qui était prévue par la théorie classique ;
— une onde ultraviolette à la fréquence double, donc de longueur d'onde moitié : 0,34715 micron.
Indépendamment des connaissances sur la structure de la matière que peut apporter cette nouvelle branche de l'optique, de telles expériences permettent d'obtenir un rayonnement laser dans le domaine ultraviolet, ce que ne pouvaient réaliser les premiers lasers à solide.

L'optoélectronique

Les interactions entre onde et matière permettent de transformer l'électricité en lumière et réciproquement. La technique des couches minces permet de réaliser des transistors, diodes, transformateurs agissant non plus sur un courant électrique, mais sur un « courant photonique » : la lumière. On s'achemine petit à petit vers la construction d'ordinateurs à lumière, environ dix fois plus compacts que les ordinateurs électroniques actuels. L'acheminement des informations se fera à la vitesse de la lumière, c'est-à-dire à 300 000 km/s, et le traitement sera, lui aussi, incomparablement plus rapide !
Comme ce bref exposé aurait souhaité le montrer, l'optique tient sa place dans le cheminement de la science.

Jacques Lafait.

Ouvrages de référence

M.-Y. Bernard : *Masers et Lasers* (P.U.F., Paris, 1964) ;

Van Heel et Velzel : *Qu'est-ce que la lumière?* (Hachette, Paris, 1967) ;

Y. Legrand : *les Yeux et la vision* (Dunod, Paris, 1960) ;

G. Bruhat et A. Kastler : *Cours de physique générale : optique* (Masson, Paris, 1959) ;

J. Terrien et A. Maréchal : *Optique théorique* (P.U.F., Paris, 1954) ;

M. Françon : *la Science contemporaine : les possibilités de l'optique moderne* (Larousse, Paris, 1964) ;

A. Maréchal et M. Françon : *Diffraction, structure des images, influence de la cohérence de la lumière* (Éd. Revue d'optique, Paris, 1960) ;

R. Prat : *l'Optique* (le Seuil, Paris, 1962) ;

P. Fleury et J.-P. Mathieu : *Lumière* (Eyrolles, Paris, 1961) ;

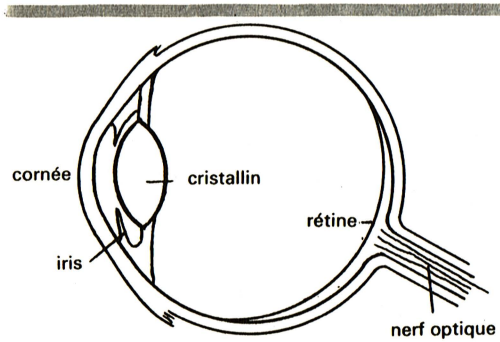
M. Françon : *Diffraction, cohérence en optique* (Gauthier-Villars, Paris, 1964).

OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE (Geometric Optics) page 211.

L'optique géométrique s'attache à déterminer la position et la qualité des images en s'appuyant sur un certain nombre de postulats :
— la propagation rectiligne de la lumière suivant des rayons lumineux indépendants les uns des autres ;
— les lois de Descartes concernant la réflexion et la réfraction.
L'étude de la qualité des images amène à rechercher les conditions de fonctionnement idéal des systèmes optiques :
— en agissant sur les positions respectives de l'objet et du système optique ; on dit qu'on a réalisé le stigmatisme lorsqu'à chaque point de l'objet correspond un point de l'image ;
— en agissant sur le système lui-même pour corriger ses aberrations. Ces aberrations désignent les défauts chromatiques ou géométriques introduits dans l'image par le système optique.
Les phénomènes d'interférences et de diffraction mettent en défaut les postulats de l'optique géométrique. Cependant, lorsque les dimensions des objets et des systèmes optiques sont très grandes dans la longueur d'onde de la radiation utilisée, l'optique géométrique donne une description macroscopique satisfaisante des phénomènes observés.

OPTIQUE PHYSIOLOGIQUE (Physiological Optics)

L'objet de l'optique physiologique est l'étude de l'œil et du mécanisme de la vision. L'œil peut être comparé à un appareil photographique très perfectionné commandé par un ordinateur électronique. Le diaphragme, c'est la pupille dont l'ouverture est réglée automatiquement pour éviter l'éblouissement. Son diamètre est d'environ 2 mm à la lumière du jour ; il augmente jusqu'à plus de 8 mm en lumière faible. L'objectif, c'est le cristallin dont la courbure variable, commandée par un muscle en anneau, réalise la mise au point de l'image sur la rétine. Ce phénomène s'appelle l'accommodation. La plaque photographique, c'est la rétine, tapissée de cellules en cônes et bâtonnets, reliées au cerveau. Ces cellules sont sensibles à la lumière qu'elles transforment, par réactions chimiques, en un grand nombre de petites décharges électriques qui sont transmises au cerveau et produisent la sensation lumineuse. Le mécanisme de cette perception comme celui de la vision des couleurs sont encore loin d'être totalement élucidés. On sait, toutefois, que ce sont les cônes de la rétine qui sont sensibles à la couleur, par l'intermédiaire de divers pigments colorés.



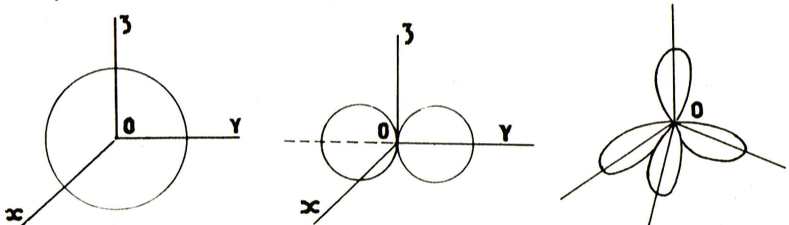
L'œil étant le plus utilisé de tous les récepteurs pour les observations scientifiques, on s'attache à définir avec précision ses caractéristiques optiques. On recherche actuellement une fonction mathématique associée à l'œil et qui permettrait, connaissant l'objet observé, d'en déduire les caractéristiques de l'image oculaire. Mais l'œil n'est pas un appareil scientifique. On ne trouve pas dans la nature deux yeux rigoureusement semblables. Les observations doivent donc porter sur des moyennes statistiques et tenir compte des imperfections du système oculaire. L'étude de ces imperfections (amétropies, défaut de convergence...) constitue une branche importante de l'optique physiologique.

ORBITALES♦ (Orbitals) pages 92, 110, 201, 277, 326, 327, 501.

♦ Se reporter à l'article : l'Atome, pages 38 et 39.

Une des conséquences du principe d'incertitude d'Heisenberg pour l'électron est qu'on ne peut espérer déterminer avec précision à la fois la vitesse et la position de l'électron en mouvement autour d'un noyau. Il faut donc renoncer à définir les trajectoires possibles, ou orbites, de cet électron.
On substitue à ces orbites la notion d'orbitale, volume à l'intérieur duquel on a une certaine probabilité (90 ou 95 %) de trouver un électron. La forme des orbitales est liée aux nombres quantiques caractérisant l'état de l'électron.
Une orbitale peut contenir zéro, un ou deux électrons, conformément au principe d'exclusion de Pauli. Encore faut-il, pour l'orbitale « saturée » à 2 électrons, que ces derniers soient de spins différents.

Exemples d'orbitales



orbitale « 1 *s* » de l'atome d'hydrogène — orbitale « 2 *py* » de l'atome d'hydrogène — orbitales « sp^3 » de l'atome de carbone

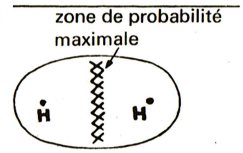
ORBITALES MOLÉCULAIRES (Molecular orbitals)

Lors d'une liaison chimique, les électrons participant à celle-ci peuvent appartenir à deux atomes (liaison covalente). On détermine dans ce cas des orbitales (volumes à l'intérieur desquels on a au total 90 % ou 95 % de chances de trouver les électrons considérés), dites orbitales moléculaires. Une des méthodes consiste à écrire que l'électron est dans un état satisfaisant à la fois à une solution de la fonction d'onde relative à un atome et à la fonction d'onde relative à l'autre. Cela se peut lorsqu'on fait des combinaisons linéaires ♦ des deux solutions. C'est la méthode C.L.O.A. (combinaison linéaire d'orbitales atomiques ; en anglais « A.O.L.C. »). Le résultat de cette opération donne des orbitales moléculaires de formes diverses, dont voici quelques exemples :

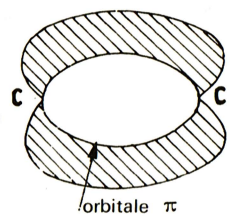
— *Molécule d'hydrogène*. L'orbitale moléculaire (unique) est une sorte d'ellipsoïde enveloppant les deux noyaux et résultant du recouvrement partiel des orbitales atomiques de chacun des atomes. A l'intérieur de ce volume, la probabilité maxi-

♦ Combinaison linéaire : si ψ_A et ψ_B sont les deux solutions, $\psi = A\psi_A + B\psi_B$ est une combinaison linéaire si A et B sont des constantes.

male de présence des électrons est atteinte au voisinage du milieu du segment reliant les deux atomes (recouvrement axial).
— On trouve dans beaucoup d'autres liaisons des orbitales de forme analogue. La liaison correspondante est nommée liaison σ (sigma).
— Dans d'autres cas, le recouvrement des orbitales se fait non pas sur l'axe, mais latéralement. C'est la liaison π (pi) qu'on trouve dans certains composés du carbone comme l'éthylène C_2H_4, où une liaison σ est doublée par une liaison de ce type. La forme de l'orbitale π est sensiblement celle qui est donnée par la figure ci-contre.



orbitale moléculaire σ de l'hydrogène



ORDINATEUR♦ (Computer) pages 115, 203, 222, 242, 245 et 246, 310, 339, 408, 458.

Sous ce nom, qui se substitue à celui de calculateurs électroniques qui ne suggère qu'une partie des applications possibles, sont regroupés des appareils de tailles très variables, mais de complexité souvent très grande.
Le but de l'ordinateur est d'effectuer à partir de données qui lui sont fournies un certain nombre d'opérations logiques, conduisant à l'exploitation des données initiales. En dehors de ces données, il faut introduire dans l'ordinateur un programme de calcul, sous forme de cartes perforées, par exemple. Moyennant cela, et avec l'aide des mémoires auxiliaires (bandes magnétiques enregistrant d'autres données en liaison avec l'opération effectuée ou des résultats intermédiaires), l'appareil donne le résultat sous des formes très diverses : résultats numériques, textes imprimés et même schéma.

♦ Se reporter à l'article : l'Électronique, pages 245 et 246.

Les performances des ordinateurs ne cessent d'augmenter par l'intervention successive des tubes électroniques, puis des semi-conducteurs, des tores ♦ de ferrites. Dans les appareils où les données sont transmises par impulsions électriques, le temps de propagation limite les performances. On fonde de grands espoirs sur des ordinateurs où les électrons seraient remplacés par de la lumière, conduite par des fibres optiques.

♦ Tores : anneaux en matière ferrimagnétique pouvant prendre deux états d'aimantation correspondant aux nombres 0 et 1 du calcul binaire.

OSCILLATEUR (Oscillator) pages 229, 310, 336, 448, 515, 527, 533.

Pris dans son sens le plus général, un oscillateur est un système générateur de vibrations (ou d'oscillations) quelle que soit la nature de la vibration émise : électrique, lumineuse, sonore, mécanique, etc. Nous pourrons appeler oscillateurs des objets aussi divers qu'un diapason, un alternateur de centrale électrique, un émetteur radio et même un atome, sans oublier le balancier d'une horloge.
Dans un sens plus restreint, l'oscillateur est la partie d'un émetteur où prennent naissance les vibrations électriques de l'onde porteuse ♦.

♦ Voir Modulation.

OSCILLATIONS : voir Vibratoire (Phénomène) et les pages 277, 318, 336, 445, 449, 459, 462 à 465, 471, 472, 486, 497, 514, 525.

OSCILLOSCOPE ÉLECTRONIQUE (Oscillograph) pages 91, 212, 235, 486, 487, 524.

Encore appelé oscillographe cathodique ♦, c'est l'appareil de base de tout laboratoire qui étudie des vibrations. Il permet de déterminer la fréquence et la forme de tout signal pouvant être traduit par une tension électrique.
Il comprend un tube cathodique dans lequel un canon à électrons émet un faisceau

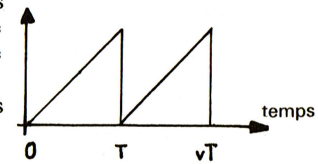
♦ Voir dessin, page 212.

d'électrons qui est reçu sur un écran fluorescent. Le faisceau passe entre deux paires de plaques, l'une horizontale, l'autre verticale, entre lesquelles on peut appliquer des tensions électriques convenablement amplifiées.
Une tension appliquée entre les plaques verticales provoque une déviation horizontale du faisceau et de la tache (spot) sur l'écran (déviation H), proportionnelle à la tension ♦.
De même, une tension appliquée aux plaques horizontales provoque une déviation verticale du spot (déviation V), proportionnelle à cette tension.

♦ La tension appliquée entre les 2 plaques crée un champ électrique auquel est soumis chaque électron du faisceau, qui s'y trouve ainsi dévié.

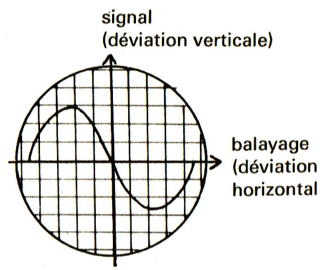
Les amplificateurs de tension H et V

La « base de temps » est un dispositif assurant une tension « en dents de scie », autrement dit, une tension qui croit régulièrement pendant un temps T, puis revient instantanément (ou presque) à sa valeur initiale. Cette tension est appliquée en H et assure le « balayage » horizontal de l'écran par le spot à une fréquence qu'on peut régler.
L'« entrée verticale » reçoit le signal étudié qui est amplifié et transmis aux plaques de déviation verticale (plaques horizontales).



Mode d'utilisation

Comment se passe l'étude du signal? Supposons, par exemple, qu'on applique une tension alternative sinusoïdale. Appliquée seule, base de temps coupée, cette tension se traduira, sur l'écran, par un trait lumineux vertical (grâce à la persistance des impressions lumineuses). De même, le balayage appliqué seul donne un trait horizontal. Lorsqu'on applique à la fois la tension étudiée et le balayage, on observe sur l'écran des courbes multiples paraissant se déplacer. Un réglage de la base de temps permet de stabiliser et d'observer, par exemple, l'aspect figuré, c'est-à-dire une sinusoïde. A ce moment, la fréquence de la base de temps est égale à celle du signal et l'aspect de la courbe est la représentation, en fonction du temps pendant la durée d'une période, de la tension variable étudiée.
Les applications de l'oscillographe sont nombreuses, car toutes les vibrations peuvent être traduites sous forme électrique, ainsi que d'autres phénomènes au caractère périodique moins évident.



OXYDANT; OXYDATION; OXYDO-RÉDUCTION♦ (Oxydizer, Oxydizing, Oxydo-reduction) pages 95, 120, 123, 124, 137, 138, 453, 519.

♦ Se reporter à l'article : la Chimie, pages 124 à 126.

L'oxygène et d'autres corps oxygénés sont capables soit de transformer un corps simple en oxyde (combustion du soufre donnant le « gaz sulfureux » ou dioxyde de soufre SO_2, oxydation du fer conduisant à l'oxyde Fe_2O_3), soit de transformer un composé en un autre plus oxygéné (passage de SO_2 à SO_3, anhydride sulfurique). Tous les corps capables de produire de telles réactions sont des oxydants.
L'étude du mécanisme de ces réactions a montré que l'élément oxydé (fer ou soufre dans les deux premières réactions) perdait des électrons : le fer, par exemple, passe à l'état d'ion Fe^{+++} par perte de 3 électrons. D'où la généralisation conduisant à la définition actuelle de l'oxydation : l'oxydation est une réaction au cours de laquelle un élément perd des électrons.
Ces électrons sont captés par l'oxydant, qui peut être, outre l'oxygène, des éléments comme le chlore ou des mélanges plus ou moins complexes. La réaction inverse (gain d'électrons) est appelée une réduction. Il résulte de ce que nous venons de voir que l'oxydation d'un élément est accompagnée de la réduction de l'élément oxydant. Il faut donc parler de réactions d'oxydo-réduction, qui consistent en des échanges d'électrons entre deux éléments.

P

PARAMAGNÉTISME (Paramagnetism) pages 168, 200, 201, 202, 333, 334, 445.

Propriété d'une substance qui s'aimante faiblement, sous l'action d'un champ magnétique, dans le sens de ce champ (au contraire, une substance diamagnétique s'aimante en sens inverse du champ).

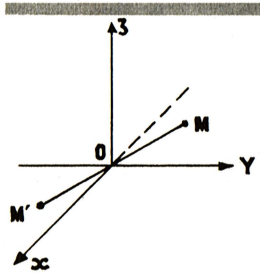
La première étude du paramagnétisme fut faite par Paul Langevin en 1905 ; elle conduisit à des résultats en bon accord avec l'expérience, prouvant que l'aimantation était d'autant plus facile que la température du corps était basse : cette loi expérimentale de Curie, vérifiée par lui aux températures élevées, le fut au voisinage du zéro absolu par Kammerling Onnes dans son laboratoire cryogénique de Leyde. L'interprétation de Langevin laissait prévoir un refroidissement par désaimantation : cet effet, très sensible aux basses températures, fut observé également par Kammerling Onnes et fut employé pour obtenir des températures plus proches encore du zéro absolu.

L'application au magnétisme des théories quantiques explique le fait que le paramagnétisme, comme le ferromagnétisme, est une propriété des éléments de transition, dont une des couches électroniques internes reste incomplète. Cette théorie due à Debye et Brillouin conservait la loi de Langevin comme une bonne approximation pour les champs magnétiques faibles.

PARITÉ ♦ (Parity) pages 55, 142, 430 à 434, 437, 510.

♦ Se reporter à l'article : la physique des hautes énergies : les Particules, pages 430 à 434.

La parité est l'opération qui consiste à transformer les coordonnées de tous les points d'un système en leur symétrique par rapport à l'origine, c'est-à-dire à passer du point M (x, y, z) au point M′ $(-x, -y, -z)$. Si cette opération laisse inchangées les fonctions définissant le système étudié, il a une parité égale à $+1$.



Les systèmes physiques ont le plus souvent une parité égale à $+1$. Si cette opération transforme les fonctions caractérisant le système en changeant leur signe, la parité est égale à -1.

La conservation de la parité a été admise comme un principe jusqu'à ce que Lee et Yang montrent, en 1958, que certaines réactions nucléaires ne conservaient pas la parité. Cette distinction est, désormais, celle qui existe entre interactions faibles (désintégration β, etc.), ne conservant pas la parité, et interactions fortes ou interactions électromagnétiques, qui la conservent.

PARTICULES (Particles)

voir l'article pages suivantes et les pages 22, 28, 29, 32 à 79, 81, 97, 172, 173, 176, 205, 250, 253, 254, 256, 259, 270, 272, 273, 275, 276, 284, 286, 306, 311, 312, 316, 326, 334, 337, 339, 340, 349, 350, 351, 353, 354, 355, 356, 358, 451, 452, 458 à 477, 484, 485, 486, 490, 494, 499, 500, 507, 508, 509, 510, 515, 518, 530, 534, 535, 537, 538.

Les particules fondamentales (ou élémentaires) sont les constituants ultimes de la matière, obtenus par la désintégration de systèmes plus complexes tels que le noyau atomique.

Le nombre des particules élémentaires, qui tend à s'accroître, fait perdre à ces particules leur qualificatif d'élémentaires. On en est déjà à rechercher quels sont leurs constituants. Peut-être les quarks ♦ ?

♦ Voir l'article : l'Évolution des idées en physique, page 298.

On a cherché à classer les particules suivant leurs propriétés. D'abord, par leur masse, comparée à celle des premières connues : l'électron et le proton. Dans l'ordre des masses croissantes, on trouva ainsi :

les photons, de masse nulle ;

les leptons, de masse comprise entre 0 et 200 fois celle de l'électron ;

les mésons, de masse de plus de 200 fois celle de l'électron ;

les baryons, de masse au moins égale à celle du proton, subdivisés en nucléons et hypérons, ceux-ci de masse supérieure à celle du proton.

On peut également considérer d'autres propriétés : certaines particules ont un spin entier. Elles satisfont aux lois statistiques de Bose-Einstein. Ce sont les bosons (photons + mésons). Les autres satisfont à la statistique de Fermi-Dirac. Elles ont un spin demi-entier : ce sont les fermions (leptons, baryons).

A chaque particule correspond une antiparticule de même masse, mais dont certaines caractéristiques sont opposées : charge, nombre baryonique, nombre leptonique.

A l'exception des photons, des électrons, des protons et de leurs antiparticules, toutes les particules se désintègrent au bout d'un temps plus ou moins long.

La physique des particules est la physique des hautes énergies

La recherche sur les particules, qui représente la branche la plus fondamentale de la recherche, puisque son but est de parvenir à la connaissance de la structure de la matière, nécessite l'emploi d'accélérateurs, dans lesquels des corpuscules tels que protons ou électrons sont lancés à des vitesses souvent proches de celle de la lumière. Dans ces conditions, leur énergie, comparée à l'équivalent de leur masse ♦, peut être très grande. Un électron a une masse de 9.10^{-31} kg, soit une énergie de l'ordre de 0,5 M*e*V ♦. Un accélérateur lui communique une énergie de 500 M*e*V, soit 1 000 fois plus. C'est ce qui explique l'expression de « hautes énergies ».

♦ D'après la relation d'Einstein, l'énergie de la particule au repos est $E = m_0c^2$ (m_0 : masse au repos ; c : vitesse de la lumière). L'énergie $E' = mc^2$ de la particule accélérée peut être beaucoup plus grande que E, du fait de la variation de masse.

La physique des particules s'intéresse non seulement aux particules elles-mêmes, mais à leurs interactions, qui sont de trois types :

— interaction électromagnétique ;

— interaction forte ;

— interaction faible.

Le comportement des particules vis-à-vis de ces interactions permet d'en faire une classification.

♦ 1 *e*V = $1{,}6.10^{-19}$ joule. 1 M*e*V = 10^6 *e*V.

La physique des hautes énergies : les particules

par Roland Omnès

La physique des hautes énergies coïncide avec l'étude des particules élémentaires. Les premières particules élémentaires ont été découvertes à la fin du siècle dernier et l'on en connaît actuellement un très grand nombre. Nous les étudierons en passant en revue les propriétés des principales d'entre elles.

L'ÉLECTRON

Nous commencerons l'étude des particules par l'une des plus simples et des plus importantes : l'électron.

Qu'est-ce qui peut caractériser une particule ? Il ne peut guère être question de sa forme ou tout au plus, s'il est possible d'en parler, on ne peut se la représenter que comme une sphère microscopique. Un point essentiel qui caractérise bien le monde dans lequel nous allons nous mouvoir est que, dans ce domaine du très petit où toutes les notions qui nous sont habituelles peuvent venir à nous manquer, on ne peut parler que de ce que l'on peut mesurer, de ce qui peut être le résultat d'une expérience. Or nulle expérience ne permet à l'heure actuelle de mesurer, s'il existe, le rayon de l'électron.

Par contre, on peut parler de sa masse et de sa charge électrique, car il est possible de les mesurer. Ce sont des nombres extraordinairement petits. Sa charge est de $4{,}80286 \times 10^{-10}$ coulomb ; cela veut dire qu'en frottant de l'ébonite avec de la laine, on arrache des milliards d'électrons. Sa masse est de $9{,}1083 \times 10^{-28}$ gramme ; autrement dit, pour obtenir un gramme d'électrons, il faudrait avoir autant d'électrons qu'il y aurait de grains de sable dans une couche d'une hauteur de 25 mètres s'étendant sur toute la Terre.

Ces chiffres sont très difficiles à se représenter. En fait, ils correspondent à une autre échelle de phénomènes. Pour comprendre les phénomènes atomiques, il vaut mieux admettre qu'on ne peut se

représenter la masse de l'électron, mais qu'il est aisé de lui rapporter toutes les autres masses d'ordre atomique. Ainsi, dire que la masse d'un proton est de $1{,}7593 \times 10^{-24}$ gramme n'est pas plus évocateur que de donner la masse de l'électron. Par contre, si nous disons que le proton a une masse correspondant à 1 840 fois celle de l'électron, nous nous représentons parfaitement bien les rapports de ces particules. Il existe une autre caractéristique fondamentale de l'électron : son spin ♦.

L'électron, inlassablement et perpétuellement, tourne sur lui-même, et le spin n'est autre que la mesure de sa rotation. Ce mouvement a d'ailleurs pour effet que l'électron se comporte comme un petit aimant. Pour le comprendre, considérons un électro-aimant ♦. Le champ magnétique dans l'électro-aimant est créé par le courant qui parcourt le bobinage, c'est-à-dire par le mouvement des électrons dans le fil de cuivre. Ainsi, le champ magnétique est créé par la rotation des électrons autour du noyau de fer. Plus généralement, lorsque des charges électriques tournent, elles créent toujours un champ magnétique perpendiculaire au plan de leur rotation. Imaginons maintenant que l'électron soit une petite sphère qui tourne sur elle-même et qui soit uniformément chargée d'électricité, que ce soit en quelque sorte une petite Terre électrique. D'après ce que nous venons de voir, les charges situées à l'équateur vont, en tournant, créer un champ magnétique dirigé selon la ligne des pôles.

Ainsi, il semble bien que l'électron soit un objet très simple : une petite sphère chargée, de masse et de charge bien définies, stable, qui tourne sur elle-même, toujours à la même vitesse.

Tout cela est bien vrai et, cependant, n'est pas si simple qu'il y paraît. Le monde de l'infiniment petit semble la réplique réduite mais exacte de quelque objet qu'il est facile de se représenter. Mais quelquefois il prend plaisir à nous égarer et à berner nos représentations conventionnelles.

L'électron tourne sur lui-même, disions-nous. C'est exact ; il tourne cependant d'une manière bien bizarre. Imaginons-le comme une toupie pivotant sans souci de la pesanteur, pointe en bas ou pointe en l'air. Nous sommes debout au-dessus d'elle et nous essayons de lire l'inscription qu'elle porte sur la bande ; nous découvrons alors, à notre plus grand étonnement, que c'est impossible : tantôt nous voyons la pointe de la toupie, tantôt la queue, jamais rien d'autre, elle tourne toujours en restant verticale. Voilà qui est clair, pensons-nous ; si l'axe de la toupie est toujours vertical, il suffit, pour lire ce qui est inscrit sur la bande, de se mettre à plat ventre. Mais là encore nous ne voyons que la pointe ou la queue de la toupie.

De quelque façon que nous procédions, de quelque direction que nous regardions, nous ne voyons jamais que cette pointe ou que cette queue, parfois l'une et l'autre, parfois seulement l'une selon la façon dont l'électron a été produit.

♦ Le spin (du verbe anglais *to spin*, tourner) est le moment angulaire de rotation propre d'un corpuscule sur lui-même. Sa valeur, bien déterminée pour chacune des particules élémentaires et exprimée en unités convenables, ne peut être qu'entière ou demi-entière.
Les particules qui ont un spin demi-entier (1/2, 3/2, 5/2...) sont appelées *fermions*. Les *bosons* ont un spin entier (1, 2, 3...). Le spin n'a pas de représentation intuitive précise. Le *spin isotopique* est une quantité physique abstraite introduite pour rendre compte du fait que certaines particules, ayant des masses voisines mais des charges électriques différentes, ont des propriétés nucléaires analogues. Le vecteur spin s'exprime en unités $\frac{h}{2\pi}$.

♦ L'électro-aimant se compose essentiellement d'un bobinage de fil de cuivre entourant un noyau de fer.

L'électron tourne autour de tous les axes, dans un sens ou dans l'autre, mais toujours selon l'axe que nos moyens de vision ou d'expérimentation sont adaptés à étudier. Cependant, son mouvement de rotation n'est pas exactement semblable à ceux que nous connaissons. Qu'y a-t-il donc de faux : nos mots, nos idées, notre vision, notre logique?

Seul le langage mathématique permet l'étude des particules élémentaires

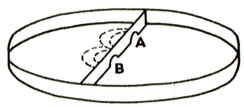
En fait, l'erreur ne vient pas des mots que nous utilisons, car il nous est toujours possible d'en étendre ou d'en rétrécir le sens. Elle ne découle pas non plus de notre logique, puisque c'est au moyen des mathématiques qu'il est possible de traiter, correctement et sans contradiction, ce spin de l'électron. L'erreur est dans notre imagination lorsque nous cherchons à « voir » un électron tourner alors qu'il s'agit là d'une particule élémentaire obéissant à des lois toutes nouvelles.

Des caractéristiques, étranges à première rencontre, des particules élémentaires, nous aurons l'occasion d'en rencontrer quelques autres. Leur maniement et leur compréhension ne peuvent être obtenus par une quelconque représentation visuelle, mais uniquement par des moyens mathématiques dont l'ensemble constitue la mécanique quantique. Seules, en effet, les mathématiques peuvent traiter verbalement et non visuellement un objet sans risque d'erreur ou d'abus de langage.

LE PHOTON

On sait que, sur l'eau, deux trains de vagues, en se rencontrant, peuvent donner lieu à des figures stationnaires auxquelles on donne le nom de figures d'interférence.

Ainsi, dans le bassin représenté ci-contre, chacun des trous, sous l'influence des vagues qui proviennent de la partie droite du bassin, devient l'origine de vagues circulaires et les deux trains de vagues, issus des trous A et B, donnent naissance en se rencontrant à des figures d'interférences hyperboliques.



De la même façon, lorsque deux trains de lumière issus d'une même source se rencontrent, ils donnent lieu à des interférences, ce qui permet de montrer que la lumière est constituée d'ondes, analogues aux vagues à la surface de l'eau.

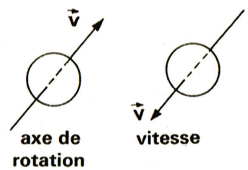
De la théorie des grains de lumière à celle des photons

D'autre part, l'effet photoélectrique, qui consiste en l'émission d'électrons par une feuille de métal (de sélénium, par exemple) frappée par la lumière, est soumis à des lois qui ne peuvent s'expliquer qu'en considérant que la lumière est constituée non par des ondes, mais par des grains. Ces grains de lumière, en frappant les atomes de sélénium, arrachent leurs électrons, lesquels peuvent alors être extraits de la plaque, ce qui constitue l'effet photoélectrique.

Ondes, grains ? C'est tout le problème de la lumière. Pour Descartes, la théorie des grains de lumière est une conséquence manifeste du fait que celle-ci se propage toujours en ligne droite. C'est Huygens qui, le premier, émet l'hypothèse fondamentale selon laquelle la lumière est une vibration, une onde analogue aux ondes sonores. Newton, cependant, rejette cette idée et reprend la théorie des grains qu'il essaie, sans grand succès d'ailleurs, d'accorder avec les phénomènes d'interférence. Au XIXe siècle, Fresnel démontre que ces mêmes phénomènes d'interférence et ceux de la polarisation exigent nécessairement que la lumière soit de nature vibratoire. Maxwell étend le problème et établit la relation entre phénomènes lumineux et électriques ; avec lui, l'hypothèse ondulatoire accroît encore sa force. Einstein, enfin, en étudiant l'effet photoélectrique, montre qu'il est impossible de le comprendre autrement qu'en admettant que la lumière est formée de corpuscules. Nous savons à présent, grâce à la mécanique quantique, qu'à toute particule est associée une onde et que toute onde peut être considérée comme formée de particules. Ainsi la lumière est-elle formée de photons.

Chaque fois que nous rencontrerons une nouvelle particule, il nous faudra maintenant donner sa carte d'identité, laquelle comportera principalement sa masse, son spin et, éventuellement, sa charge. La masse du photon est aisée à retenir car elle est nulle. En effet, la théorie de la relativité restreinte nous apprend que plus une particule va vite, plus sa masse est grande, que cette masse tend à devenir infinie lorsque la vitesse de la particule tend à s'approcher de celle de la lumière. Or la lumière n'est que photons et, par sa nature même, le photon doit donc aller à la vitesse de la lumière. Il devrait donc avoir, d'après la relativité, une énergie infinie, ce qui est absurde. Fort heureusement, la théorie de la relativité permet qu'une particule n'ait qu'une énergie finie, tout en se déplaçant à la vitesse de la lumière, à condition toutefois que sa masse soit strictement nulle, ce qui est donc nécessairement le cas du photon.

Le photon a un spin 1, double de celui de l'électron. On peut, si on le veut, dire qu'il tourne sur lui-même deux fois plus vite que l'électron. Le photon ne peut tourner sur lui-même qu'en sorte que son axe de rotation soit dirigé selon sa vitesse ; c'est là l'origine des phénomènes de polarisation de la lumière.



La lumière naturelle non polarisée est constituée par une quantité de photons dont les spins sont répartis au hasard, soit dans le sens de leur mouvement, soit en sens contraire. Au contraire, la lumière complètement polarisée circulairement est constituée de photons qui tournent tous dans le même sens. Lorsque le spin est dirigé dans le sens de leur mouvement, la lumière est polarisée à droite ; lorsque le spin est en sens opposé du mouvement, la lumière est polarisée à gauche ♦.

♦ Cela constitue l'interprétation de la polarisation dans l'hypothèse du photon.

Le photon peut prendre naissance lorsqu'une particule électriquement

chargée voit son énergie modifiée pour une cause quelconque. Il peut être absorbé dans les mêmes conditions.
Prenons le cas de l'atome d'hydrogène. Dans cet atome, l'électron peut se trouver sur l'une quelconque d'un certain nombre d'orbites ♦ aux rayons quantifiés.

♦ Voir l'article : l'Atome, page 39.

Considérons les deux premières couches orbitales de cet atome, celle de rayon *r* et la suivante de rayon 4 *r*. Si l'électron se trouve à un moment donné sur la seconde orbite, il dispose de plus d'énergie que s'il se trouvait sur la première. Rien ne l'empêche de retomber sur la première orbite, en se rapprochant du noyau et en perdant de l'énergie. Comme l'électron est une particule chargée, il peut, si son énergie se modifie, émettre un photon qui s'échappe immédiatement de l'atome, emportant l'énergie que l'électron a perdue en tombant sur la plus petite orbite. C'est là tout le phénomène de l'émission de la lumière par les atomes (cette lumière appartenant d'ailleurs, dans ce cas particulier, au domaine des rayons X).
Suivons le photon qui vient de s'échapper. Il va poursuivre son chemin à la vitesse de la lumière. Sur sa route, il rencontre un autre atome d'hydrogène, lequel a son électron sur la première orbite. Le photon entrant en collision avec cet électron pourra être absorbé par celui-ci. Cependant, l'énergie acquise par l'électron en absorbant l'énergie du photon n'est pas suffisante pour le libérer de l'attraction de son noyau. L'électron va donc devoir retomber sur une autre orbite quantifiée de l'atome et ce sera précisément la seconde, puisque, d'après la manière dont il est né, ce photon a précisément pour énergie la différence des énergies que possède un électron lorsqu'il est respectivement sur la seconde et sur la première orbite. Il en résultera l'absorption du photon par l'électron, qui passera alors de la première à la seconde orbite.
Ce qui est vrai pour l'atome d'hydrogène l'est également pour les atomes plus complexes et pour les molécules. Un atome — ou une molécule — est un assemblage plus ou moins complexe d'électrons, dont le mouvement obéit à des lois quantiques, de sorte que l'énergie totale de tout le système électronique est bien définie (quantifiée). Parmi tous ces états de mouvement, il en existe un dont l'énergie est la plus petite possible, qui porte le nom d'état fondamental. Lorsque, pour une raison quelconque, un atome — ou une molécule — n'est pas dans son état fondamental, il pourra y revenir en émettant un photon. De même, étant dans l'état fondamental, il pourra absorber un photon de rencontre en passant à un nouvel état de mouvement d'énergie plus élevée.

♦ L'énergie d'un photon est variable ou, plutôt, il existe des photons ayant des énergies différentes. Cela se traduit par une émission de radiations de longueur d'onde d'autant plus courte que l'énergie du photon est grande.

De l'énergie des photons dépend l'effet photoélectrique

Si le photon a une énergie suffisamment grande ♦, il pourra même arracher un électron. Ainsi, dans l'effet photoélectrique, des photons frappent une feuille de sélénium ; cette feuille est un assemblage d'atomes, elle contient donc des électrons. Si les photons ont une

énergie suffisante pour arracher les électrons de la feuille, ces électrons sortiront et il sera possible de les observer. Par contre, si l'énergie du photon est insuffisante, il ne pourra qu'exciter les électrons dans le sélénium, en modifiant leur mouvement, sans qu'ils s'échappent. D'où une des lois fondamentales de l'effet photoélectrique : celui-ci ne peut avoir lieu que si les photons ont suffisamment d'énergie.
On peut comprendre ainsi les phénomènes lumineux dans tout leur ensemble. Par exemple, lorsque le filament d'une lampe électrique est échauffé, cette augmentation de température se traduit par une agitation des atomes du filament. En se heurtant, par suite de cette agitation, deux atomes peuvent passer de leur état fondamental à un état d'énergie plus élevée d'où ils repasseront à l'état fondamental en émettant chacun un photon : au total, on observe donc la transformation de la chaleur en lumière et un flux intense de photons s'échappe du filament. On explique ainsi, dans le détail, les phénomènes de réflexion, d'absorption et de polarisation de la lumière, ainsi que ceux de la couleur. Mais cela dépasse déjà le domaine des particules élémentaires.
L'émission et l'absorption des photons par les électrons a une conséquence intéressante. En effet, l'électron peut perpétuellement émettre des photons en les réabsorbant aussitôt, de sorte qu'il s'entoure d'un nuage de photons, tout comme un jongleur s'entourerait d'un nuage de balles. Le rayon de ce nuage est d'environ 3×10^{-10} cm, et c'est ce qu'il faut entendre lorsqu'on parle de rayon de l'électron. Ce n'est pas le rayon de l'électron à proprement parler, mais celui de la région qu'il remplit de photons.

L'électrodynamique quantique

L'étude de toutes les conséquences qu'impliquent l'émission et la réabsorption des photons par les particules chargées, électrons, protons, etc., forme une branche de la physique qui a reçu le nom d'électrodynamique quantique. Celle-ci consiste essentiellement en une synthèse de l'électrodynamique classique de Maxwell, de la mécanique quantique et de la théorie de la relativité restreinte. Elle remonte à 1935, mais sa forme actuelle date de 1945 ; elle est due à Schwinger et Tomonaga. Les plus intéressants développements sont dus à Schwinger, Feynman et Dyson ♦ et s'achèvent pratiquement en 1949. C'est dans cette branche de la physique qu'ont été enregistrés les accords les plus spectaculaires entre la physique expérimentale et théorique.
L'un des plus beaux de ces résultats porte le nom d'effet Lamb. Cet effet est une particularité de l'atome d'hydrogène. En fait, lorsque l'on étudie de près la structure de la seconde orbite de l'atome d'hydrogène, on constate que, pour diverses causes dont l'étude nous entraînerait malheureusement trop loin, celle-ci se

♦ J.-S. Schwinger, R.P. Feynman, Dyson : physiciens théoriciens. Schwinger et Feynman ont partagé le prix Nobel de physique avec S. Tomonaga en 1965.

subdivise en trois orbites dont les énergies diffèrent quelque peu. L'une de ces énergies est assez éloignée des deux autres, lesquelles sont excessivement rapprochées. Lamb ♦ a réussi à mesurer l'écart de ces deux niveaux d'énergie avec une précision admirable, puisqu'elle comporte 5 décimales. Mesurée expérimentalement à l'aide de la fréquence des photons que l'électron peut émettre en passant de l'un de ces deux états très rapprochés à l'autre, cet écart est égal à 1 057,77 ($\pm$ 0,1) mégacycles. Le calcul donne 1 057,8 mégacycles, soit exactement la même valeur dans les limites de l'erreur expérimentale. C'est là incontestablement l'un des plus magnifiques résultats de la physique moderne.

♦ Lamb : expérimentateur américain, prix Nobel.

Une autre découverte de l'électrodynamique quantique, d'ailleurs plus ancienne, est que l'attraction entre des particules de charges électriques opposées comme le proton et l'électron dans l'atome d'hydrogène est due à un continuel échange de photons entre ces particules. Nous n'insisterons pas là-dessus, d'autant plus que l'étude des forces nucléaires nous donnera l'occasion de rencontrer un phénomène analogue où les photons seront remplacés par des mésons π.

LES NUCLÉONS

Les nucléons (c'est le terme générique que l'on donne aux protons et aux neutrons) sont les constituants essentiels des noyaux.

Ils ont sensiblement la même masse : $1{,}67239 \times 10^{-24}$ gramme pour le proton et $1{,}67470 \times 10^{-24}$ pour le neutron. Leur différence essentielle est dans la charge électrique. En effet, le proton est chargé positivement, sa charge étant égale et opposée à celle de l'électron, alors que le neutron est neutre, comme son nom l'indique. Valseurs bien accordés, ils tournent sur eux-mêmes à la même vitesse, laquelle correspond à un spin 1/2, égal à celui de l'électron. Ce mouvement de rotation a d'ailleurs les mêmes caractéristiques troublantes que chez ce dernier. Ils ont un moment magnétique (ce sont donc de petits aimants) différent, ce qui est une conséquence de leurs charges distinctes. Pour produire des électrons, on utilise des tubes électroniques, pour produire des protons, on arrache les électrons de l'hydrogène par des décharges électriques.

Ces protons obtenus en faisceau sont encore très lents et très mous. Pour les utiliser à des expériences, il est nécessaire de les accélérer. A cette fin, on dispose d'un certain nombre d'appareils plus ou moins complexes : cyclotrons, synchrotrons, synchrocyclotrons.

Le cyclotron consiste essentiellement en un puissant électro-aimant. On insère le faisceau de protons dans l'entrefer ♦ de cet électro-aimant et le champ magnétique a pour effet de faire tourner les protons selon une trajectoire circulaire. Si on les laissait à eux-mêmes, les protons continueraient à tourner, toujours à la même vitesse. Il s'agit donc de les accélérer. Pour cela, on utilise la technique de la « piézocution

♦ Entrefer : espace compris entre les deux pôles de l'électro-aimant.

réitérée ». Celle-ci consiste à donner, à chaque tour, une impulsion aux protons, les accélérant ainsi par une suite de poussées. Chacune de ces poussées s'obtient en lançant une onde électromagnétique qui accélère légèrement le proton, tout comme une vague accélère un nageur quand elle le saisit dans son creux. On peut ainsi arriver à communiquer des énergies considérables aux protons.

Dans le plus récent et le plus puissant de ces accélérateurs de protons, qui vient d'être achevé à Serpoukov (il s'agit d'un synchrocyclotron), les protons sont amenés à des vitesses si voisines de celle de la lumière que leur masse, par un effet relativiste, devient 70 fois ce qu'elle est naturellement au repos.
On peut alors projeter ces faisceaux de protons très rapides sur des cibles de fer, de plomb, d'hydrogène liquide, etc. Des collisions violentes qui en résultent sortent de multiples particules : protons, neutrons et d'autres que nous rencontrerons plus loin : mésons π, μ, K, hypérons, antiprotons... C'est en étudiant en détail le déroulement de ces collisions que les physiciens ont découvert bien des secrets de la constitution des noyaux atomiques et des propriétés des particules élémentaires.

LE MÉSON π

Quel est le mécanisme des forces nucléaires qui maintiennent les protons et les neutrons dans le noyau? En fait, le problème se scinde en deux questions. La première est de nature fondamentale : quel est le mécanisme de l'interaction entre deux nucléons? La seconde est essentiellement de nature technique : connaissant expérimentalement la force qui s'exerce entre deux nucléons, comment en déduire les propriétés des assemblages complexes de nucléons que sont les noyaux?

Le mécanisme des forces internucléoniques

En 1937, on pouvait classer les forces qui se manifestent dans la nature en deux catégories : d'une part, celles que l'on comprenait, lesquelles constituaient presque toutes les forces connues, et, d'autre part, les forces nucléaires. On savait que les forces de nature électrique présidaient à la constitution des atomes, des molécules, des solides et, en somme, que presque tous les phénomènes physiques à notre échelle n'étaient que des manifestations des forces électriques de l'atome. Si l'on ajoutait à celles-ci les forces de gravitation, aussi bien celle de la pesanteur que la gravitation proprement dite ♦, on savait tenir là la source de toute la physique, telle qu'elle se manifeste à notre échelle. Or rien ne paraissait mieux connu que les forces électriques aux physiciens qui venaient justement de comprendre

♦ Qui gouverne l'interaction des astres.

théoriquement toutes les propriétés des atomes en appliquant la mécanique quantique, alors nouvelle, à l'étude des interactions électromagnétiques atomiques. D'autre part, la relativité générale était suffisamment passée dans le domaine public pour que l'on ait une idée exacte des forces gravifiques. Or voilà que l'on découvrait les forces nucléaires qui président à la liaison des nucléons dans le noyau et celles-ci, par toutes leurs caractéristiques, s'affirmaient d'une nature totalement nouvelle.

— *Nouvelle par leur portée.* Alors que les forces gravifiques se font sentir sur la distance qui sépare la Terre du Soleil, que les ondes électromagnétiques issues d'un émetteur de radio atteignent les antipodes, les forces nucléaires ne s'exercent pas en dehors du noyau. Ainsi, deux nucléons n'interagissent que lorsqu'ils sont à une distance de l'ordre du fermi (10^{-13} cm), et deux noyaux n'interagissent que lorsqu'ils viennent en contact (mis à part l'interaction électrique qu'ils peuvent exercer l'un sur l'autre grâce à la charge positive de leurs protons).

— *Ces forces n'étaient pas moins nouvelles par leur grandeur.* Si, en effet, deux protons se trouvent à une distance d'un fermi, la force qui s'exerce entre eux a une double origine : une attraction nucléaire et une répulsion électrique (l'attraction est environ cent fois plus grande que la répulsion). Quant à l'interaction gravifique entre les protons, elle est 10^{35} fois plus petite. On peut comparer la force nucléaire à celle d'un homme, la force électrique étant alors celle d'une souris et la force gravifique pas même celle du plus insaisissable des microbes. Il est bien clair que, dans ces conditions, le problème du mécanisme et de l'origine des forces nucléaires constitue un problème d'une nature fondamentale.

1937 : formulation des premières hypothèses concernant les interactions entre nucléons

En 1937, donc, le physicien japonais Ideki Yukawa se posait, comme tant d'autres, ce problème et tenait à peu près le raisonnement suivant. Pour comprendre les forces nucléaires, inspirons-nous de ce que nous connaissons bien : les forces électriques. Lorsqu'un proton et un électron s'attirent, de quoi s'agit-il en réalité ? D'après la théorie de la relativité restreinte ♦, nous ne devons pas considérer que le proton et l'électron exercent l'un sur l'autre, sans intermédiaire, une action à distance ; sinon, comme ils interagissent à grande distance, tout mouvement de l'un se ferait immédiatement sentir par l'autre, contrairement au principe qui veut qu'aucune action ne peut se propager plus vite que la lumière. L'intermédiaire responsable de l'attraction électrostatique entre le proton et l'électron est bien connu : il est constitué par les ondes électromagnétiques qui sont de même nature que la lumière, et donc formées de photons.

♦ Voir page 494 et l'article : Historique, pages 279 à 284.

En dernier ressort, les forces électrostatiques sont donc dues à un échange de photons entre le proton et l'électron.
L'interaction entre les nucléons ne peut être due à des photons, puisque ceux-ci sont déjà responsables de la force électrique qui s'exerce entre deux protons et que les forces de nature proprement nucléaire sont mille fois plus fortes. Cependant, rien n'empêche d'imaginer que, au lieu d'échanger des photons, les nucléons échangent d'autres particules, que nous allons appeler les mésons.
Ainsi, imaginons, par exemple, un neutron et un proton en présence l'un de l'autre. Chacun d'eux va émettre périodiquement des mésons qui seront réabsorbés par l'autre. Le fait que les forces nucléaires soient plus intenses que les forces électriques vient de ce qu'un proton émet beaucoup plus de mésons que de photons. Contrairement aux photons dont la masse est nulle, il est nécessaire de supposer que les mésons ont une masse, pour que l'interaction nucléaire ne s'étende pas à grande distance. Yukawa développa quantitativement cette hypothèse, en utilisant les méthodes de la théorie quantique des champs (qui n'est autre que l'extension des méthodes de la mécanique quantique à l'étude des champs de force, tels que les champs électrique, magnétique ou gravifique). Sachant que les nucléons n'interagissent guère au-delà d'un fermi, il put, d'une part, déduire que le méson devait avoir une masse égale à environ 300 fois celle de l'électron et, d'autre part, que le méson devait lui-même interagir très fortement avec les nucléons.
Les arguments étaient de poids et il ne restait qu'à chercher expérimentalement si cet hypothétique méson existait ou non. Où le chercher ? La réponse était simple : si un proton de très grande vitesse heurte un noyau, il est possible que l'un des mésons émis par le proton ne soit pas rattrapé par le noyau. Il suffira pour cela que le proton incident ait une vitesse, une énergie suffisantes pour céder l'énergie de masse qu'exige la création réelle du méson, soit mc^2 d'après la célèbre formule d'Einstein, m étant la masse du méson. Dans ces conditions, le méson s'échappera et on pourra alors observer son interaction avec les noyaux d'une émulsion photographique. Les protons rapides étant fournis par le rayonnement cosmique qui nous vient de l'espace sidéral et du Soleil, il suffisait donc de laisser des émulsions photographiques recevoir ce rayonnement cosmique et de les développer. A partir de là, il s'agissait de trouver, dans les émulsions, des traces de particules interagissant fortement avec les noyaux ♦.

♦ Dans le chapitre sur les moyens de détection, on verra comment on peut mesurer la masse d'une particule d'après sa trace dans l'émulsion et comment se manifeste son interaction avec les noyaux.

Historique et propriétés du méson π

Vint un jour où l'on crut bien avoir trouvé le méson. On avait découvert une particule de masse égale à 240 fois celle de l'électron, que l'on s'empressa d'appeler méson et que l'on désigna par la lettre

grecque μ ♦. Las ! elle n'interagissait pas avec le noyau plus fortement que les électrons et, malgré la valeur suggestive de sa masse, elle ne pouvait être tenue pour responsable des forces nucléaires.

♦ *mu*, initiale de méson, ce mot, lui-même d'origine grecque, signifiant « qui est entre ».

Enfin, en 1947, on découvrit que les μ observés dans les émulsions provenaient de la désintégration d'autres particules. Celles-ci interagissaient fortement avec les noyaux de l'émulsion et avaient une masse égale à 273 fois celle de l'électron. Ce ne pouvait être que le responsable attendu des forces nucléaires. On le baptisa méson π. A l'heure actuelle, on connaît la plupart des propriétés du méson π, car il n'est plus nécessaire d'aller le chercher parmi les rayons cosmiques. Les grands accélérateurs modernes fournissent des faisceaux entiers de mésons π, d'une énergie bien définie, qu'il est facile d'envoyer sur des cibles pour étudier les réactions nucléaires qu'ils produisent. L'étude des propriétés du méson π (ou *pion*) a été longtemps le thème principal de la physique des hautes énergies. Qu'a-t-on appris par là ?

Le méson π est presque la particule la plus simple que l'on puisse imaginer : comme nous l'avons dit, sa masse est 273 fois celle de l'électron, soit environ le septième de celle des nucléons. Contrairement à toutes les particules que nous avons rencontrées jusqu'à présent, il n'a pas de spin, il ne tourne pas sur lui-même.

On connaît trois espèces de mésons π : deux chargés, l'un positivement, c'est le π^+ (lire « pi plus »), l'autre négativement, c'est le π^- (« pi moins »), le troisième est neutre, c'est le π^0 (« pi zéro »). Aucun des mésons π n'est stable, le π^+ et le π^- ne vivent que $2{,}5 \times 10^{-8}$ seconde ♦. On peut néanmoins les observer car, comme les mésons π produits dans les laboratoires et rencontrés dans les rayons cosmiques ont la plupart du temps une vitesse voisine de celle de la lumière (300 000 kilomètres à la seconde), ils peuvent facilement parcourir trois mètres avant de mourir. En fait, ils parcourent aisément plusieurs dizaines de mètres, et c'est là une confirmation frappante de la théorie de la relativité. D'après cette théorie, en effet, le temps s'écoule moins vite pour un voyageur que pour les observateurs qui le regardent passer ♦. Ainsi, lorsqu'un méson π^+ ou π^- se déplace, bien qu'il ne vive en fait que 10^{-8} seconde (ce que l'on vérifie quand il va très lentement), nous le voyons, nous, observateurs immobiles dans notre laboratoire (qu'il traverse à une vitesse proche de celle de la lumière), vivre jusqu'à 40 fois plus et parcourir ainsi des distances beaucoup plus grandes que celles qui lui sembleraient à première vue accessibles.

♦ 2,5 fois un cent-millionième de seconde.

♦ Voir Langevin (voyageur de).

Les mésons π sont les principaux responsables des forces nucléaires

Les expériences les plus courantes que l'on a effectuées avec les mésons consistent à étudier leur diffusion par des noyaux et, plus particulièrement, par les protons qui constituent les noyaux d'hydrogène. Ainsi, on envoie un faisceau de mésons sur une cuve emplie

d'hydrogène liquide et l'on étudie, à l'aide de compteurs ou de chambres à bulles ♦, combien de mésons sont envoyés dans chaque direction de l'espace. Cela permet aux théoriciens de remonter aux lois élémentaires qui président à l'interaction individuelle entre un méson et un proton. La connaissance de ces lois permet en principe à son tour de calculer les forces nucléaires, en supposant qu'elles sont dues, selon l'hypothèse de Yukawa, à un échange de mésons entre les nucléons, mais ce programme de calcul n'est pas aisé à réaliser.

♦ Voir page 441.

A l'heure actuelle, le calcul ne permet pas de déduire complètement les forces nucléaires de la connaissance de l'interaction entre les mésons π et les nucléons. Cependant, on ne cesse de faire des progrès de plus en plus probants dans cette direction et, d'ores et déjà, il est démontré que les pions sont effectivement responsables des forces nucléaires ou tout au moins de la majeure partie d'entre elles.
Comme on le voit, le problème des mésons n'est pas des moindres, puisque douze années d'expériences et de calculs n'ont pas suffi à le résoudre. Cependant, il n'y a pas lieu de se plaindre, car il a permis d'importantes découvertes, tant expérimentales que théoriques, dans l'étude des propriétés des particules élémentaires en général et ce sont les problèmes les plus difficiles dont la solution nous apprend le plus.
Le méson neutre π^0 est moins favorisé par le sort que ses deux frères. En effet, au lieu de vivre 10^{-8} seconde, il ne vit que 10^{-16} seconde : le rapport de dix secondes à trente ans ! Sitôt formé, il disparaît en donnant naissance à deux photons, se résolvant ainsi en lumière, après une vie trop brève pour qu'on l'ait bien connue.

Les forces dans les noyaux

Nous venons de voir que deux nucléons en présence sont capables d'échanger des mésons π, ce qui donne lieu à une force dont la portée est de quelques fermis. De la même façon, un nucléon isolé émet perpétuellement des mésons π et les réabsorbe, ceux-ci n'allant pas plus loin qu'un fermi : il se trouve ainsi entouré d'un « nuage » de pions rattrapés bien longtemps avant qu'ils aient le temps de mourir, puisque le temps de ce processus d'émission-réabsorption est de l'ordre de 10^{-23} seconde, alors que les pions peuvent vivre 10^{-8} seconde. Ce « nuage » de mésons a un rayon d'un fermi et, par conséquent, un nucléon et son inséparable nuage ont le même rayon que la portée des forces entre deux nucléons. Autrement dit, deux nucléons que l'on peut se représenter comme des sphères d'un rayon d'un fermi n'interagissent que lorsqu'ils sont pratiquement au contact l'un de l'autre.
Imaginez des joueurs de rugby sur un terrain ; ce sont les nucléons. Tant que le ballon n'est pas près d'eux, ils courent mais ne se rap-

prochent pas. Vienne un ballon (le méson π) entre deux joueurs : les deux rugbymen s'accrochent, se suivent, s'attrapent tant que le ballon reste entre eux. Dans un noyau, chaque joueur est perpétuellement en train de « dribbler » sa balle, de reprendre celle de son voisin et de perdre la sienne : les balles sortent perpétuellement des poches et y rentrent (en supposant que les poches puissent enfermer un ballon de rugby et qu'il y ait beaucoup plus d'une balle sur un terrain). On peut ainsi conclure que le noyau est le siège d'une mêlée continuelle dont son existence même est le résultat.
A ces forces purement nucléaires agissant uniquement entre nucléons au contact s'ajoutent les forces électrostatiques des protons qui se repoussent tous les uns des autres, en raison de leur charge électrique positive. Ces forces électriques s'étendent à grande distance. Ainsi, lorsqu'un noyau contient un grand nombre de protons et de neutrons, chaque proton est soumis à l'attraction de ses voisins (au nombre de 5 ou 6) et à la répulsion de tous les autres protons. Lorsque le nombre de protons devient très grand, il en résulte que les forces de répulsion finissent par l'emporter sur les forces d'attraction, bien qu'elles soient beaucoup plus faibles : le nombre l'emporte sur la force. Le noyau n'est plus stable et tend à se désintégrer en des morceaux plus petits où les forces nucléaires puissent l'emporter nettement sur les forces électriques. C'est là le phénomène de fission.

LE NEUTRINO

Le neutrino, c'est l'absence réalisée. Cette particule mallarméenne prouve que l'on peut être en n'étant rien.
Elle n'a pas de charge électrique, d'où son nom de « petit neutre ». Elle n'a pas davantage de masse : cela, jamais un physicien du XIXe siècle n'eût voulu l'admettre. En effet, Newton nous a appris que, sous l'action d'une force, un corps, quel qu'il soit, reçoit une accélération inversement proportionnelle à sa masse. Si donc une particule a une masse nulle, la force la plus minuscule, l'action la plus délicate seront pour elle d'une brutalité inouïe et la projetteront avec une accélération infinie. Or, pour constater l'existence de cette particule, il faudrait au moins la mettre en évidence à l'aide d'un appareil, lequel ne peut se concevoir sans que la particule interagisse avec lui. Ainsi, tenter d'observer expérimentalement une particule de masse nulle, c'est l'envoyer à l'infini, donc se condamner à ne pas pouvoir l'observer. Pour un physicien de l'époque classique, la particule de masse nulle était donc une contradiction interne ou, tout au moins, un paradoxe insaisissable : l'objet dont la définition implique l'impossibilité de déceler son existence. Comment échapper à ce paradoxe ?
La réponse est dans la théorie de la relativité. Comme on le sait, l'un des points marquants de cette théorie est que rien ne peut se

déplacer à une vitesse supérieure à celle de la lumière, que l'on désigne par la lettre c ♦. Il y a donc une échappatoire à l'argumentation de notre docte contradicteur du siècle dernier : la particule de masse nulle, avec son accélération initialement infinie, ne va pas pouvoir atteindre une vitesse infinie, mais acquerra seulement la vitesse de la lumière. En fait, on montre qu'une particule de masse nulle se déplace toujours à la vitesse de la lumière et que, Ahasvérus ♦ condamné par les lois de la relativité, elle ne connaît et ne peut connaître aucun repos, aucun arrêt. Elle naît, et vole jusqu'à sa mort.

♦ c = 300 000 kilomètres à la seconde.

♦ Ahasvérus : le juif errant, personnage légendaire condamné par Jésus-Christ à errer éternellement.

Historique du neutrino

Pendant très longtemps, on n'a pu saisir ni mettre en évidence les neutrinos.

Il semble qu'à ce point un aréopage chargé de faire respecter les lois du bon sens populaire ne pourrait que condamner le physicien coupable de soutenir l'existence d'une particule aussi incroyable. Et la réponse de l'accusé ne pourrait être que : « Et pourtant, il tourne ! » Car le neutrino tourne sur lui-même : il a un spin 1/2 comme l'électron. Il est également capable d'emporter de l'énergie dans sa course, et cela nous amène à raconter son histoire.

Vers 1935, on effectua les premières expériences quantitatives précises sur la désintégration β des noyaux atomiques ♦. Celle-ci se produit lorsqu'un neutron, parmi ceux qui constituent le noyau d'un atome, se désintègre en donnant naissance à un proton et un électron.

♦ Voir Radioactivité.

Le nom de désintégration β remonte aux premières études des désintégrations naturelles faites par Pierre et Marie Curie, qui avaient observé que le radium se désintègre en donnant naissance, selon les cas, à trois types de rayonnement, de caractéristiques bien distinctes, qu'ils avaient nommés α, β, γ ♦. On mesurait donc l'énergie et l'impulsion emportées par chacune des particules issues de la désintégration, noyau résiduel et électron. Or il fallait là se rendre à une inquiétante évidence : compte tenu de l'énergie recélée par le noyau initial et de celle du noyau résiduel, une certaine quantité d'énergie avait été perdue dans la désintégration !

♦ Le rayonnement α est constitué de noyaux d'hélium, le rayonnement β d'électrons et le rayonnement γ de photons.

La loi de la conservation de l'énergie conduit à l'hypothèse du neutrino

Malgré les bouleversements que la physique a subis depuis le début de ce siècle et l'originalité des idées nouvelles qui sont apparues depuis, il faut reconnaître aux physiciens l'esprit conservateur. Ils n'abandonnent jamais une idée ou une loi qui ont fait leurs preuves que lorsqu'ils sont acculés à des contradictions sans issue. Avant de renoncer à une loi aussi essentielle qu'est la loi de la conservation de l'énergie, qui nous a guidés dans tous les avatars de l'histoire de la physique classique, qui a franchi victorieusement le cap de la théorie

de la relativité, qui a constitué le fil directeur de toutes les recherches en physique atomique et nucléaire, il fallait donc se convaincre qu'aucune autre solution ne permettait d'éviter une telle extrémité. Cette solution, c'était le neutrino, et elle est due à Wolfgang Pauli. Une particule très légère, même de masse nulle, neutre et sans interaction avec les compteurs, emporte l'énergie manquant au bilan. Elle permet également de comprendre un point plus subtil de la radioactivité β, lié à la conservation du spin, si l'on suppose qu'elle a un spin égal à celui de l'électron, autrement dit si l'on suppose qu'elle tourne sur elle-même et qu'un observateur la voit toujours de face ou de dos, jamais de profil.
Une étude plus poussée du spectre de l'électron, c'est-à-dire la mesure des électrons qui, dans un échantillonnage de noyaux radioactifs β, partent avec une énergie déterminée, permit de prouver que toute l'énergie manquante était effectivement emportée par une seule particule, de masse si petite qu'on ne pouvait la mesurer. Cela constitua aux yeux de tous les théoriciens une preuve irréfutable de l'existence du neutrino, confirmée en 1956 par l'expérience des deux physiciens américains, Clyde et Cowan. En plaçant des compteurs dans une enceinte bétonnée (afin de réaliser une protection contre le rayonnement extérieur) au voisinage d'un réacteur atomique, source puissante de neutrinos, Clyde et Cowan parvinrent enfin à enregistrer ceux-ci.
Depuis, grâce aux grands flux de neutrinos issus des accélérateurs et à de puissants moyens de détection, on a pu étudier en détail les neutrinos et découvrir qu'en fait ils se décomposaient en quatre espèces différentes.

LES ANTIPARTICULES

De quelque façon que l'on essaie de s'y prendre pour concilier mathématiquement le fait que les particules élémentaires doivent obéir à la fois à la mécanique quantique et à la relativité restreinte, on trouve qu'il doit exister, pour chaque particule, une antiparticule qui en est distincte ou non.
En fait, c'est ainsi que la première antiparticule, le positron ou antiélectron, est apparue dans le monde des physiciens. En 1929, le professeur P.A.M. Dirac, de l'université de Cambridge, établit pour la première fois une théorie permettant de tenir compte des lois de la relativité restreinte dans le mouvement quantique de l'électron. Sa théorie offrait quelques particularités très favorables : elle permettait, entre autres, de mettre en évidence mathématiquement le spin de l'électron, de calculer son moment magnétique (l'expérience confirmait en tous points le calcul), de mesurer avec précision les valeurs des niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène (là encore, l'expérience confirmait les résultats). Une seule difficulté cependant :

d'après cette théorie, il devait exister dans la nature une particule très semblable à l'électron (même masse, même spin, mais de charge électrique opposée). Cette particule, Dirac l'appelait antiélectron ou positron (pour marquer le fait que sa charge devait être positive). Les discussions allaient ferme sur cet énigmatique positron jusqu'en 1931, date à laquelle on le découvrit effectivement. On constata que des photons d'énergie suffisante pouvaient disparaître en donnant naissance à une paire électron-positron selon la formule ♦ $\gamma \longrightarrow e + \bar{e}$. Ce processus, par lequel le photon, que l'on considérait comme de l'énergie pure, donne naissance à des particules massives, reçut le nom de « matérialisation de l'énergie ».

♦ γ désignant un photon, e un électron, $\bar{e}$ un positron.

Comme nous le disions précédemment, toute particule doit avoir une antiparticule. Il s'agit tantôt de la même particule, c'est le cas du photon ou du méson π^0, qui sont identiques à leurs antiparticules, tantôt d'une particule distincte, c'est le cas de l'électron et du positron, du proton et de l'antiproton.

L'antiparticule d'une particule chargée a la charge opposée : c'est le cas du π^+ dont l'antiparticule est le π^-, du μ^+ et du μ^-, du proton positif et de l'antiproton négatif.

L'antiparticule d'une particule neutre peut être soit cette particule elle-même (c'est le cas du photon ou du méson π neutre), soit une particule différente (antineutron et antineutrino).

Le cas du neutron et de l'antineutron est assez étonnant ; ces deux particules, d'après les critères que nous avons adoptés jusqu'à présent, paraissent en tous points semblables (même masse, même spin, même neutralité électrique), mais elles sont cependant distinctes. En effet, alors que deux neutrons entrant en collision ne peuvent que rejaillir sans modifications internes, un neutron et un antineutron se détruisent en donnant naissance à une gerbe de mésons π.

De façon plus générale, deux particules, en se rencontrant, peuvent disparaître en donnant naissance soit à des photons, soit à des mésons π. C'est ce qui se produit, dans le premier cas, avec les électrons et, dans le second cas, avec les protons et les neutrons. Dirac avait prévu, en 1929, non seulement le positron, mais aussi l'antiproton et l'antineutron. Pourquoi donc fallut-il attendre 1955 avant de découvrir l'antiproton, alors que le positron avait été mis en évidence expérimentalement en 1931 ?

La réponse est très simple. Dans le monde qui nous entoure, il n'y a pas d'antiparticules ; il faut les produire en laboratoire. Or la seule façon de les produire est la matérialisation de l'énergie. Autrement dit, il faut envoyer deux particules l'une sur l'autre assez vite pour que, sous la violence de leur choc, leur énergie de mouvement se matérialise sous la forme d'une paire d'antiparticules. Il faut donc que cette énergie de mouvement soit supérieure à l'énergie de masse ($2\ mc^2$) des particules de la paire. Alors qu'il y a longtemps que l'on disposait d'accélérateurs capables de communiquer à des

particules sous forme de mouvement l'énergie de masse de deux électrons (ou, si l'on préfère, d'un électron et d'un positron), il a fallu attendre 1955 pour fabriquer un accélérateur assez puissant pour fournir l'énergie de masse d'un proton et d'un antiproton.

LA PARITÉ

Vers 1930, le physicien hongrois Eugène Wigner se posait la question de savoir si les atomes distinguaient la gauche de la droite. Après avoir étudié tous les aspects alors connus de la question, il y répondait par la négative et en déduisait la loi de « conservation de la parité ». Cette loi a été infirmée à la fin de 1957, et leurs auteurs, Lee et Yang, se sont vu attribuer le prix Nobel de physique, en 1968, pour cette découverte.

Le raisonnement que tenait Wigner était de nature strictement mathématique et se fondait sur la théorie des groupes ♦, laquelle a longtemps été considérée comme une des branches les plus abstraites des mathématiques.

♦ Étude mathématique et systématique des groupes possibles.

Mais, avant d'examiner si un proton ou un électron peut distinguer la droite de la gauche, voyons comment nous y parvenons nous-mêmes et quels sont, en général, les moyens dont nous disposons pour cela.

On apprend aux enfants : « Gauche : côté du cœur. » Mais, si nous avions le cœur au milieu du corps, ou deux cœurs symétriques, deux foies, deux rates, qu'à tout élément de notre corps situé d'un côté — jusqu'aux corps chimiques qui composent nos cellules — il corresponde un élément semblable qui en soit le symétrique par rapport au plan médian du corps, comment pourrions-nous distinguer la droite de la gauche? Il y aurait évidemment une méthode banale qui consisterait à se faire une marque sur un poignet et, en fait, c'est cette méthode-là que nous utilisons dans la vie courante. Un automobiliste n'a pas besoin de se tâter la poitrine pour savoir où est son cœur lorsqu'il doit conduire. Il « connaît » sa droite, car il l'a appris étant enfant et sa mémoire l'a enregistré. La mémoire n'est rien d'autre qu'une habitude prise par les cellules du cerveau, qu'une marque dans le cerveau qui distingue gauche et droite. Mais si nous n'avions pas de mémoire?

A ce point, il est clair que notre méthode est moins rigoureuse que celle de Wigner, car on imagine difficilement un individu sans mémoire se poser de telles questions. Continuons cependant.

Si un amnésique partiel veut distinguer sa droite de sa gauche, il lui reste la ressource de toujours porter une vis dans sa poche et de se rappeler, en supposant qu'il le puisse, qu'elle tourne de gauche à droite lorsqu'elle s'enfonce.

L'idée la plus simple que l'on puisse se faire d'une particule élémen-

taire est celle d'un point, éventuellement d'une sphère minuscule. Le proton, le neutron, le neutrino, le méson μ, le photon, les hypérons ont un spin et tournent sur eux-mêmes, le méson π et le méson K n'ont pas de spin. Dans cette image, il y a donc des sphères qui tournent et des sphères fixes.
Un proton, un électron ou un méson μ sont des particules que l'on n'imagine guère que symétriques et dont toutes les expériences nous indiquent qu'elles le sont. Elles sont donc dans le cas de notre homme à deux cœurs (qui ici n'en a aucun). Peut-on leur reconnaître de la mémoire? On n'a jamais rien constaté de semblable. La seule façon qu'ils auraient de marquer la différence entre la gauche et la droite serait donc éventuellement d'être capables d'exhiber à un moment donné un aide-mémoire tel que la vis de notre amnésique ou, à la rigueur, d'être une vis.
Voyons comment on pourrait tester expérimentalement s'il y a distinction entre la gauche et la droite à l'échelle des particules élémentaires.
Pour cela, il va nous falloir préciser comment nous différencierons ces deux orientations fondamentales. La méthode la plus simple, qui est d'ailleurs très voisine de celle qu'utilisent les mathématiciens, consiste à remarquer que gauche et droite s'échangent par réflexion dans un miroir. En effet, lorsque nous nous regardons dans un miroir, le personnage que nous y voyons a la place du cœur à sa droite et sa main droite est identique à notre main gauche. On peut donc dire qu'un phénomène ne comporte pas de distinction entre la gauche et la droite s'il est identique à son image dans un miroir. En physique, lorsqu'un phénomène ou un objet est identique à son image dans un miroir, on dit qu'il conserve la parité, l'expression provenant de la notion mathématique de fonction paire ou impaire ♦.

♦ Voir Aperçu mathématique, page 21.

Dans les raisonnements qui vont suivre, nous considérerons souvent des particules douées de spin, qui tournent donc sur elles-mêmes, et nous envisagerons les particules correspondantes vues dans un miroir. La première question à régler est de savoir comment vont se correspondre les sens de rotation.
Imaginons donc une particule, par exemple un proton, douée de spin et qui tourne autour d'un axe. Un observateur, regardant cette particule directement ou au travers d'un miroir perpendiculairement à son axe, la verra dans chaque cas tourner dans le même sens. Autrement dit, le spin ne change pas dans cette réflexion.
Si, par contre, l'axe du spin est parallèle au miroir, l'observateur verra le proton réfléchi tourner dans le sens contraire du proton vu directement : cette fois, la réflexion inverse le spin.
Considérons maintenant une expérience typique de physique nucléaire : envoyons un faisceau de mésons π sur une cible d'hydrogène liquide. En pratique, le faisceau contient un nombre considé-

rable de mésons (disons 10^7) et la cible est constituée par des molécules d'hydrogène H_2, chacune étant constituée de deux atomes d'hydrogène liés, chaque atome ayant pour noyau un proton. Dans un cas typique, la cible pourra contenir 10^{20} protons. Cette expérience consiste donc à faire charger un carré d'infanterie d'un effectif égal à plus de dix milliards de fois la population du globe par une cavalerie de l'ordre de la population d'un pays européen non négligeable, puis de recommencer l'opération plusieurs milliers de fois. En pratique, on ne peut qu'enregistrer le nombre de mésons π qui, après avoir frappé les protons (il se trouve que les mésons π interagissent très peu avec les électrons), ont été rejetés dans une certaine direction. Pour cela, on dispose quelques compteurs de mésons dans certaines directions de l'espace et l'on enregistre le nombre de mésons ayant atteint chaque compteur.
Dans les cibles d'hydrogène dont on dispose actuellement, les protons ont leurs spins orientés vers le haut ou vers le bas, au hasard, de sorte que sur le nombre il y en a très sensiblement autant qui tournent dans chaque direction.
Pour vérifier la conservation de la parité, on pouvait songer à comparer l'expérience avec celle qui s'en déduit par une réflexion dans un miroir parallèle au faisceau incident de mésons π. Comme il n'y a pas de distinction, dans le système initial, entre les directions du haut et du bas (le faisceau de mésons π étant supposé horizontal et les protons qui ont leur spin vers le haut étant en nombre égal à ceux qui ont leur spin vers le bas), il ne saurait y en avoir dans la direction des produits des collisions. Il y a donc autant de mésons π qui rebondissent vers le haut que vers le bas et, comme la réflexion dans le miroir a justement pour effet de remplacer le haut par le bas, elle ne modifie rien.

Imaginons maintenant que l'on ait réussi à orienter les spins de tous les protons vers le haut, de sorte qu'ils tournent tous dans le même sens. On dit dans ce cas que la cible de protons est polarisée vers le haut. Il y a maintenant une direction privilégiée, le haut, dans le système initial. Il n'y a donc plus de raison statistique a priori pour qu'il y ait autant de mésons π émis vers le haut que vers le bas. Si donc, contrairement à ce que l'on pouvait prévoir, il y en a autant, on a là un élément précieux d'information. Or, si l'on regarde dans un miroir horizontal le bataillon des protons dont le spin pointe vers le haut, on verra toujours, comme nous l'avons établi précédemment, ce même bataillon de spins orientés vers le haut.
Dire que la parité est conservée, c'est dire que l'expérience vue dans le miroir donne les mêmes résultats que l'expérience directe. Or, si un méson part vers le haut, on le voit, dans le miroir, partir vers le bas. Autrement dit, si la parité est conservée dans l'interaction entre les mésons et les protons, on doit voir autant de mésons π

émerger vers le haut que vers le bas. Sinon, la conservation de la parité est violée, il y a distinction entre la gauche et la droite à l'échelle des particules élémentaires π et proton.
C'est ainsi que l'on peut vérifier la conservation de la parité. Si l'expérience dont nous venons de parler n'a pas été faite, car nous ne disposons pas encore actuellement de cibles de protons polarisés, d'autres analogues, portant en particulier sur les spectres des rayons X émis par les atomes et des rayons γ émis par les noyaux, avaient permis d'établir jusqu'en 1957 la loi de la conservation de la parité. Toutes les expériences faites jusqu'alors pour tester allaient dans le même sens et l'on pouvait ainsi admettre cette loi comme l'une des plus fondamentales de la physique. Elle se montrait, dans l'étude difficile de la physique nucléaire, un guide infiniment précieux pour classer les phénomènes et comprendre leurs caractéristiques.
Le grand mérite de Lee et Yang fut d'étudier systématiquement les preuves expérimentales de cette loi et de déterminer ses limites. Ils constatèrent ainsi que la précision des expériences faites sur les spectres β des noyaux ne permettait pas de tirer de conclusion quant à la conservation de la parité par les interactions faibles. Ces interactions sont à la source de la plupart des désintégrations des particules élémentaires instables et, en particulier, de la radioactivité β. D'autre part, ils constatèrent qu'aucune expérience directe de vérification de la conservation de la parité n'avait été faite sur ces désintégrations et ils proposèrent aux expérimentateurs d'en effectuer une très simple, portant sur la désintégration du cobalt 60, dont le noyau comporte 27 protons et 33 neutrons. Ce cobalt, préparé artificiellement, est instable ; il se désintègre en devenant un noyau de nickel (28 protons et 32 neutrons) et en donnant naissance à un électron et un neutrino. D'autre part, il possède un spin propre, comme beaucoup d'autres noyaux. L'expérience proposée par Lee et Yang consistait à polariser un échantillon de cobalt 60 et à examiner s'il y avait ou non autant d'électrons qui partaient vers le haut que vers le bas.

Étudions de plus près comment cette expérience peut permettre de tester la conservation de la parité. Supposons les spins des noyaux de cobalt 60 orientés vers le haut. Il y a donc un sens privilégié dans l'espace et il n'y a aucune raison statistique a priori pour que, parmi les électrons émis par ces noyaux, il y en ait autant qui partent vers le haut que vers le bas, à moins que la parité ne soit conservée par cette désintégration. Or, si la parité est conservée, c'est qu'il n'y a aucune différence avec l'expérience considérée, qu'on la regarde directement ou dans un miroir. Mais, comme nous l'avons vu auparavant pour les protons, les noyaux de cobalt 60 restent semblables à eux-mêmes lorsqu'on les regarde dans un miroir horizontal, lequel échange le haut et le bas. Si donc la parité est conservée dans cette

expérience, il doit partir autant d'électrons vers le haut que vers le bas. Cette expérience fut réalisée par Mme Wu ♦, spécialiste de la polarisation des noyaux, dans les laboratoires de l'université de Columbia. La conclusion était nette et irréfutable : parıté non conservée. Depuis, de nombreuses expériences ont été faites sur les désintégrations β d'autres noyaux et sur les désintégrations d'autres particules : mésons π, mésons μ, mésons K, hypérons Λ, Σ. Toutes ont montré une violation de la loi de conservation de la parité.

♦ Mme Wu, physicienne expérimentatrice, spécialiste de résonance magnétique nucléaire.

Il importe de faire ici une remarque sur la portée de ce résultat. La violation de la parité a été établie pour les interactions de désintégration, ou interactions faibles. Pour les autres intégrations qui s'exercent entre les particules élémentaires, telles que les interactions entre les nucléons à l'intérieur du noyau et les interactions électromagnétiques responsables de l'émission et de l'absorption de la lumière, des rayons X et des rayons γ, les expériences anciennes restent valables et prouvent la conservation de la parité. Autrement dit, le résultat essentiel de l'expérience est de suggérer une distinction d'un caractère fondamental entre les interactions de désintégration et les autres interactions.

Si nous revenons aux considérations que nous faisions plus haut sur la distinction entre la gauche et la droite au niveau des particules élémentaires, la conservation de la parité dans les interactions nucléaires et électromagnétiques montre que le proton, le neutron, le méson π, l'électron, le photon, le μ ne font aucune distinction entre la gauche et la droite. Par contre, quand le méson π ou le méson μ se désintègrent, cette désintégration viole la parité, distingue entre la droite et la gauche. Or, dans chacune de ces désintégrations, comme dans la radioactivité γ, un neutrino ou un antineutrino est émis. Cela nous rappelle la façon dont notre amnésique symétrique pouvait distinguer la droite de la gauche en exhibant une vis.

Un certain nombre de physiciens émirent l'hypothèse que la violation de la parité dans les désintégrations où apparaissent des neutrinos pouvait être due au fait que le neutrino distinguait intrinsèquement entre la gauche et la droite : c'est la vis que sort le méson π de sa poche en se désintégrant. De ce point de vue, le neutrino, qui se déplace, rappelons-le, à la vitesse de la lumière, aurait *toujours* son spin orienté dans la direction vers laquelle il tend : imaginez un derviche tournant sur lui-même et projeté tête la première. De même, l'antineutrino aurait toujours son spin orienté dans la direction inverse de celle de son mouvement : imaginez un antiderviche, tournant dans le même sens que le premier et projeté les pieds devant. Comme, dans une désintégration donnée, il ne peut apparaître de neutrinos à la place d'antineutrinos (c'est là un fait expérimental), il en résulte que la parité ne peut être violée dans une telle désintégration. Cette théorie semble à l'heure actuelle en accord quantitatif avec les faits.

AUTRES PARTICULES

En 1948, le tableau des particules élémentaires semblait clos. Le zoo des particules venait de s'enrichir du méson π, attendu depuis dix ans, et, les forces nucléaires promettant d'être expliquées par cette nouvelle recrue, aucun phénomène inexpliqué, aucune théorie déjà confirmée ne faisaient supposer l'existence de nouvelles particules inconnues, mis à part l'antiproton et l'antineutron (qui devaient être découverts en 1955).

Cependant, encouragés par la découverte du méson π, les cosmiciens continuaient à trier des milliers de photons et à étudier la nature des traces qu'ils y observaient.

Ils avaient démasqué quelques phénomènes étranges. Ils avaient vu, par exemple, une particule chargée se désintégrer en deux mésons π, une particule chargée se désintégrer en trois mésons π, et bien d'autres encore. Le nombre de ces phénomènes et la précision des mesures croissant conduisirent à reconnaître l'existence de tout un essaim de particules nouvelles. Ces visiteurs du soir bouleversaient à nouveau la sage ordonnance d'une physique enfin disciplinée. Alors que l'on s'apprêtait à approfondir en toute quiétude les relations et la nature des quelques particules déjà connues, ils annonçaient de nouveaux problèmes et laissaient apercevoir une complexité insoupçonnée des problèmes anciens. Perplexes et prudents, les physiciens appelèrent ces nouveaux hôtes « particules étranges ».

Depuis 1950, l'entrée en lice des grands accélérateurs a permis de s'affranchir en partie des méthodes artisanales de la physique des rayons cosmiques. Avec leur aide, on peut maintenant produire en grand nombre les particules étranges et étudier systématiquement leurs propriétés, tout comme auparavant on avait étudié celles des électrons, des protons, des neutrons, des mésons π. On ne peut dire que les résultats acquis jusqu'ici soient très spectaculaires, bien que les problèmes qui restent à résoudre soient, eux, des plus essentiels.

LES PARTICULES ÉTRANGES ET LEURS PROPRIÉTÉS

Les particules étranges actuellement connues se répartissent en deux grandes catégories : les mésons et les hypérons.

La famille des mésons, dans laquelle on classe déjà l'ancien méson π, contient en outre le méson K.

La famille des hypérons comprend la particule Λ *(lambda)*, le Σ *(sigma)* et le Ξ *(xi)*.

Certaines de ces particules se présentent avec plusieurs charges ; toutes ont des antiparticules. Le méson K, par certaines de ses propriétés, rappelle le méson π. Les hypérons, par certaines des leurs, rappellent les nucléons. En particulier, le méson K, comme

le π, est relativement léger (sa masse est environ la moitié de celle des nucléons), alors que les hypérons sont tous plus lourds que les nucléons. Tous interagissent fortement avec les nucléons et les mésons π.

a) *Les mésons K*

Les mésons K ont une masse égale à 966 fois celle de l'électron, soit environ 3 fois celle du méson π, une demi-fois celle du nucléon. On les reconnaît sous deux formes électriques : un méson K^+ chargé positivement (sa charge est la même que celle du proton) et un méson K^0 neutre. Chacun d'eux admet une antiparticule : l'antiparticule du K^+ est le K^- qui est chargé négativement. L'antiparticule du K^0 est un autre méson neutre, de même masse, que l'on désigne par $\overline{K}^0$.
Comme nous l'avons déjà signalé à propos de l'antineutron, deux antiparticules ne se distinguent pas seulement par le signe de leur charge électrique, et des antiparticules neutres peuvent être distinctes : ainsi, l'antineutron est différent du neutron et l'antineutrino du neutrino, et, de la même façon, l'anti-K^0 est différent du K^0 (rappelons que, par contre, l'anti-π^0 est identique au π^0). Que le K^0 et le $\overline{K}^0$ soient différents apparaît, par exemple, dans le fait que, en entrant en collision avec un noyau, le K^0 est renvoyé élastiquement alors que le $\overline{K}^0$ peut disparaître en donnant naissance à un hypéron Λ. Ces quatre particules $(K^+, K^0, \overline{K}^0, K^-)$ ont été effectivement observées. Elles n'ont pas de spin (spin zéro).

Le K^+ vit 10^{-8} seconde et peut se désintégrer de nombreuses manières : en donnant des mésons π, des mésons μ, des électrons... Les modes de désintégration du K^- sont analogues. Le K^0 vit 10^{-10} seconde et se désintègre de façon non moins variée.
Il n'y a pas tellement lieu de s'étonner de la multitude de ces modes de désintégration car — la désintégration d'une particule élémentaire devant respecter la loi de conservation de l'énergie, laquelle, d'après la relation fondamentale d'Einstein, implique une restriction sur les masses des produits de désintégration — le fait que le méson π ou le μ se désintègrent d'une seule manière tient essentiellement au petit nombre de particules que l'on peut combiner de façon que la somme de leurs masses soit inférieure à celle du π ou du μ. La désintégration d'une particule telle que le K est le résultat, régi par le hasard, de la compétition entre les divers modes de désintégration possibles.
Certaines des désintégrations du méson K ont pendant longtemps représenté un mystère. Il existe, en effet, des cas de désintégrations en deux et en trois π qui impliqueraient respectivement pour le

comportement du méson K sous l'action d'une réflexion, c'est-à-dire sa parité, des propriétés contradictoires. On supposa longtemps l'existence de deux mésons K, de même masse et de même spin, ayant, sous l'action d'une réflexion, des propriétés différentes : l'un se désintégrant en deux π, l'autre en trois π, chacun d'eux pouvant en outre présenter tous les modes de désintégration déjà évoqués. Cependant, compte tenu de l'état actuel de notre connaissance des lois qui régissent les interactions des particules élémentaires, que ces deux K distincts aient la même masse et soient produits exactement de la même façon semble être une invraisemblable coïncidence. Cette difficulté, comme nous l'avons dit plus haut, conduisit Yang et Lee à se demander si, après tout, la parité était effectivement conservée dans les désintégrations.

b) *L'hypéron* Λ

L'hypéron Λ a une masse légèrement supérieure à celle du nucléon (2 181,5 masses électroniques pour le Λ, 1 836,12 pour le proton). Il n'apparaît que sous la forme neutre.
Il ressemble beaucoup au neutron ; masses voisines, même spin (1/2). De plus, il interagit avec les nucléons aussi fortement que les nucléons entre eux et l'on a observé de multiples exemples de noyaux où un neutron était remplacé par un Λ. Ces noyaux d'un type tout nouveau, qui d'ailleurs ne durent que 4×10^{-10} seconde (le temps pour le Λ de se désintégrer), ont reçu le nom d'hypernoyaux ou hyperfragments.
Le Λ vit donc 4×10^{-10} seconde et se désintègre en donnant soit un proton et un π^-, soit un neutron et un π^0.

$$\Lambda - p + \pi^-$$
$$n + \pi^0$$

Il existe évidemment un anti-lambda que l'on a pu observer et que l'on désigne par $\overline{\Lambda}$.

c) *Les hypérons* Σ

Ils ressemblent beaucoup aux hypérons Λ. D'une masse légèrement supérieure (2 327 masses électroniques), ils ont également le spin 1/2 et interagissent fortement avec les nucléons.
On les connaît sous trois formes électriques : le Σ^+ positif, le Σ^- négatif et le Σ^0 neutre. Il existe un anti-Σ^+ négatif mais différent du Σ^-, un anti-Σ^- positif différent du Σ^+, un anti-Σ^0 différent du Σ^0.
Le Σ^+ vit 10^{-10} seconde et se désintègre en donnant un proton et un π^0 ou bien un neutron et un π^+.
Le Σ^- vit 2.10^{-10} seconde en donnant un neutron et un π^-.
Le Σ^0 vit moins de 10^{-11} seconde en donnant un Λ et un photon.

LE TABLEAU DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

Toutes les particules élémentaires de la physique sont groupées en trois familles : leptons, mésons, baryons. A l'heure actuelle, cette classification a été adoptée à peu près par tous les physiciens. Elle n'est en fait que la conséquence de la classification moderne des interactions ; c'est donc cette dernière que nous allons examiner en premier lieu.

Pour cela, regardons ce qui se passe dans un laboratoire où l'on procède par exemple à l'étude des propriétés des mésons π^+ ; nous y trouvons un accélérateur, d'où l'on extrait par des procédés magnétiques un faisceau de mésons π^+ que l'on envoie sur une cible d'hydrogène. En entrant en collision avec les protons qui constituent les noyaux des atomes d'hydrogène, les mésons π^+ subissent une interaction forte, ce qui signifie qu'un grand nombre de π^+ subissent l'action des protons en passant près de ceux-ci. Par contre, l'action que ces mésons π^+ subissent de la part des électrons est beaucoup plus faible ; cette action résulte du fait que les électrons, chargés négativement, et les mésons π^+, chargés positivement, s'attirent. On désigne sous le nom d'interactions électromagnétiques toutes les interactions qui sont précisément dues aux propriétés électriques ou magnétiques des particules, ou bien encore qui mettent en jeu des photons. Enfin, les mésons π^+, après avoir vécu 10^{-8} seconde, se désintègrent en donnant naissance à un méson μ^+ et un antineutrino, et l'on a coutume de dire que cette désintégration est l'effet d'une interaction faible.
Ces distinctions correspondent à des différences quantitatives bien marquées. Imaginons, en effet, que nous disposions de trois faisceaux de particules : le premier formé de mésons π, le second d'électrons et le troisième de neutrinos ; imaginons également que ces faisceaux soient aussi semblables que le permettent les différences entre les particules qui les constituent : même énergie, même épaisseur de faisceau, même nombre de particules dans le faisceau. Envoyons maintenant ces trois faisceaux sur des protons. On constate que, là où cent mésons π sont déviés de leur chemin par un proton, un seul électron est dévié, là où 10^{15} mésons subissent une collision (un million de milliards !), un seul neutrino la subit. Si l'on considère le facteur temps, la différence est encore plus frappante : là où il faudra attendre une seconde pour voir un méson π du faisceau dévier de sa route, il faudra attendre deux minutes pour l'électron et plus de trois cent millions de siècles pour le neutrino. Vu autrement : la collision entre le méson π et le nucléon ne dure que 10^{-23} seconde, alors que le proton et l'électron demandent 10^{-20} seconde pour interagir, et le neutrino 10^{-8} seconde. L'interaction π-proton appartient à la catégorie des interactions fortes, celle entre le proton

et l'électron aux interactions électromagnétiques, celle entre le proton et le neutrino aux interactions faibles ♦.

Certaines particules peuvent subir les trois types d'interaction : ainsi, le méson peut interagir fortement avec le proton, électromagnétiquement avec l'électron, faiblement lorsqu'il se désintègre. Les plus typiques des interactions fortes sont celles que subissent les nucléons entre eux, lesquelles ne sont autres que les forces nucléaires.

Presque toutes les désintégrations sont le fait des interactions faibles. Quelques-unes cependant sont dues aux interactions électromagnétiques : ainsi, la désintégration du méson π^0 neutre en deux photons est d'origine électromagnétique, alors que celle du π^+ est due à une interaction faible. La distinction d'origine se manifeste d'ailleurs dans les temps de vie puisque le π^+ vit cent millions de fois plus longtemps que le π^0.

Il est clair, enfin, que toutes les particules chargées peuvent subir des interactions électromagnétiques et que, par définition même, le photon ne subit que ces interactions.

♦ Pour être complet, il conviendrait d'ajouter à ces interactions l'interaction gravitationnelle 10^{15} fois (!) plus faible que les interactions faibles elles-mêmes.

particule	*charge*	*masse*	*vie moyenne*	*symbole*	*spin*	*antiparticule*	*type*
photon	0	0	infinie	γ	1	idem	
neutrino	0	0	infinie	ν	1/2	antineutrino $\bar{\nu}$	leptons
électron	$-e$	1	infinie	e	1/2	positron e^+	
lepton μ (muon)	$-e$	206	2×10^{-6} s	μ	1/2	muon μ^+ positif	
méson π π^+ (pion)	$+e$	273	$2{,}5 \times 10^{-8}$ s	π^+	0	π^-	mésons
π^-	$-e$	273	$2{,}5 \times 10^{-8}$ s	π^-	0	π^0	
π^0	0	264	10^{-16} s	π^0	0	π^+	
méson K K^+ (kaon)	$+e$	966	$1{,}3 \times 10^{-8}$ s	K^+	0	méson K nég. $\overline{K^+}$ ou K^-	
K^0	0	965	$1{,}3 \times 10^{-10}$ s	K^0	0	antiméson-K^0 ou $\overline{K^0}$	
nucléons :							
proton	$+e$	1836	infinie	p	1/2	antiproton $\bar{p}$	
neutron	0	1838	13 minutes	n	1/2	antineutron $\bar{n}$	
hypérons :							baryons
lambda Λ	0	2181	4×10^{-10} s	Λ	1/2	anti-Λ ou $\overline{\Lambda}$	
sigma Σ	$+e$	2327	10^{-10} s	Σ^+	1/2	anti-Σ ou $\overline{\Sigma}$	
	$-e$	2341	2×10^{-10} s	Σ^-	1/2		
	0	2335	10^{-11} s	Σ^0	1/2		
ksi Ξ	$-e$	2583	10^{-10} s	Ξ^-	1/2	anti-Ξ ou $\overline{\Xi}$	
	0	2594	10^{-10} s	Ξ^0	1/2		
oméga Ω^-	$-e$	3316	?	Ω^-	3/2		

Dans le tableau de la page précédente, nous trouvons :

1. Le photon, agent des interactions électromagnétiques, seul de son espèce.

2. Les leptons : neutrino, électron, muon. Le neutrino n'apparaît que dans les interactions faibles (c'est-à-dire dans les désintégrations) et ne subit qu'elles. L'électron et le μ sont chargés et peuvent donc subir des interactions électromagnétiques. Ils apparaissent également dans certaines désintégrations (celles des π, neutrons, K, l'électron dans celle du μ lui-même). Leur nom de leptons ♦ provient du fait que ce sont également les particules les plus légères. Leur spin est 1/2.

♦ Ce mot, tiré du grec *leptos*, signifie légèreté.

3. Les mésons : mésons π et K, plus lourds que les leptons, qui peuvent subir des interactions fortes. Leur spin est 0.

4. Les baryons ♦ ; nucléons, hypérons Λ, Σ, Ξ, qui subissent également des interactions fortes. Ce sont les plus lourds (comme leur nom l'indique). Ils sont de spin 1/2.

♦ Baryon : du mot grec *barus* qui signifie lourd.

31 particules stables ou qui se désintègrent par interaction faible ou électromagnétique ont été observées : γ, ν, $\bar{\nu}$, e, $\bar{e}$, μ^+, μ^-, π^+, π^0, π^-, K^+, K^0, $\bar{K}^0$, K^-, n, p, $\bar{n}$, $\bar{p}$, Λ, $\bar{\Lambda}$, Σ^+, Σ^0, Σ^-, Ξ^-, Ξ^0, $\bar{\Sigma}^+$, $\bar{\Sigma}^0$, $\bar{\Sigma}^-$, $\bar{\Xi}^-$, $\bar{\Xi}^0$, Ω^-. Il en existe d'autres, beaucoup plus nombreuses, qui se désintègrent par interactions fortes. On les appelle résonances.

LES MOYENS DE DÉTECTION DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

La plaque photographique

La méthode la plus ancienne, toujours employée d'ailleurs pour détecter les particules élémentaires, est la plaque photographique. Rappelons qu'une plaque photographique est préparée de telle sorte que la lumière, c'est-à-dire les photons, à la suite d'un phénomène d'ionisation, provoque dans la plaque une réaction chimique caractéristique.

Cette ionisation peut être provoquée par toutes les particules élémentaires chargées grâce à l'interaction de leur charge avec celle des électrons des atomes actifs de la plaque photographique. Ainsi, une particule chargée (proton, électron, π^+, etc.) arrachera sur son passage un grand nombre d'électrons, laissant une trace que l'on pourra révéler. Arracher tant d'électrons absorbe de l'énergie : la particule se ralentit donc, pour s'arrêter parfois dans la plaque, et l'on peut alors, en mesurant l'épaisseur de sa trace, connaître sa vitesse ou sa masse.

Chambres à étincelles

Une seconde méthode de détection des particules chargées est le compteur de Geiger-Müller ♦. Il consiste en un tube cylindrique dont l'axe est parcouru par un fil, le tube et le fil étant portés l'un par rapport à l'autre à un potentiel électrique élevé. Si une particule chargée traverse le compteur, elle arrache des électrons aux atomes du gaz qui l'emplit, et ces électrons se précipitent vers l'électrode (fil ou tube) qui l'attire, engendrant ainsi une étincelle que l'on enregistre. En comptant les étincelles, on peut compter le nombre de particules chargées. Les versions les plus modernes de ces appareils sont les chambres à étincelles.

♦ Voir Chambre et Compteur.

La chambre à bulles ou à gouttelettes

On a développé, pour observer les trajectoires des particules chargées, des méthodes qui n'ont pas les inconvénients des plaques photographiques. La nature chimique complexe de celles-ci rend en effet souvent difficile la mesure ou l'interprétation de leurs enregistrements. Pour cela, on utilise le système des chambres à bulles ; imaginez une bouteille de bière immobile : pas une bulle ne s'y trouve. A la moindre agitation, on va voir apparaître des bulles qui trahiront le mouvement. En pratique, au lieu de bière, on utilise de l'hydrogène ou du propane liquide en état de sursaturation ♦.
Toute particule chargée, en arrachant, là encore, des électrons aux atomes, pourra provoquer l'ébullition ; en établissant la pression et en prenant une photographie au moment précis où la particule passe, on verra un fin chapelet de bulles naissantes sur la trajectoire de la particule chargée. Tout comme dans le cas des émulsions photographiques, on peut, en comptant les bulles, calculer la vitesse ou la masse de la particule.

♦ C'est-à-dire sous une pression telle qu'il devrait bouillir à la moindre perturbation, n'étaient sa propreté et son immobilité.

La méthode de la chambre de Wilson est très analogue à celle des chambres à bulles : au lieu de liquide en sursaturation, on utilise un gaz sous une pression telle qu'il devrait se liquéfier ; le passage d'une particule chargée se traduit alors par un chapelet de gouttelettes.

L'effet Cerenkov

Une autre méthode de détection est fondée sur l'effet Cerenkov. Pour le comprendre, rappelons-nous ce qui se passe quand un avion dépasse le mur du son, c'est-à-dire quand sa vitesse dépasse celle du son dans l'air. Il se produit une onde de choc. On peut en déduire qu'un projectile allant plus vite que le son engendre le son.
Rappelons-nous maintenant que la lumière se déplace moins vite dans les corps matériels transparents que dans le vide. Ainsi, sa

vitesse, dans l'eau, est réduite aux trois quarts et, dans le verre, aux deux tiers de sa vitesse dans le vide.
On sait, par ailleurs, que la plupart des particules élémentaires étudiées dans les laboratoires se déplacent à des vitesses voisines de celle de la lumière dans le vide. Si donc on les envoie dans de l'eau, elles continueront à se déplacer à la même vitesse, qui sera alors supérieure à celle de la lumière dans l'eau. Or, tout comme un projectile plus rapide que le son produit du son, un projectile plus rapide que la lumière produit de la lumière, une onde de choc lumineuse. Si l'on a eu soin de placer dans l'eau une substance scintillatrice amplifiant cette lumière (par un phénomène de fluorescence), on pourra constater qu'une particule chargée signale son passage par une émission de lumière notable que l'on pourra enregistrer.

Avec ces quelques appareils : plaque photographique, chambres de Wilson, chambres à bulles, chambres à étincelles, compteurs à effet Cerenkov et d'autres dont l'étude nous mènerait trop loin, les physiciens peuvent enregistrer les événements du monde des particules élémentaires. Ils comptent ou enregistrent les particules entrantes et sortantes, ils remontent de leurs traces ou du temps qu'elles mettent à aller d'un compteur à un autre à leur vitesse et parviennent ainsi à accumuler ces données expérimentales sur lesquelles se fonde toute l'analyse théorique.

LES RAYONS COSMIQUES

On ne saurait conclure un article traitant des particules élémentaires sans dire un mot des rayons cosmiques. C'est, en effet, dans le rayonnement, dans le flot des particules que nous envoie le ciel que l'on a pu mettre pour la première fois en évidence le muon, le méson π, le méson K, les hypérons Λ et Σ.
Les rayons cosmiques sont essentiellement formés d'électrons et de protons. Leur principale source paraît être les restes des supernovae, ces étoiles qui tout à coup éclatent en gagnant brutalement en éclat plusieurs magnitudes ♦ et dont on compte par galaxie environ une tous les cent ans. Dans les formidables nuages gazeux de ces étoiles en explosion, les atomes sont dépouillés de leurs électrons ; noyaux et électrons se mélangent, se heurtent, tourbillonnent, formant ce que l'on appelle un plasma ♦. Les remous de ces particules chargées créent des champs magnétiques violemment fluctuants, qui sont capables d'accélérer protons et électrons selon un processus découvert et analysé par Fermi. D'autres mécanismes sont d'ailleurs probablement à l'œuvre.
Une fois accélérés, protons, noyaux complexes, électrons traversent les espaces interstellaires, et nous pouvons les enregistrer.

♦ Deux étoiles diffèrent d'une magnitude lorsque leurs luminosités sont dans un rapport de dix.

♦ Voir l'article : la Physique des plasmas.

Nous ne considérons pas ici les problèmes cosmologiques mis en jeu par les rayonnements cosmiques. La caractéristique la plus frappante est, à notre point de vue, les énergies énormes que l'on y rencontre parfois : des millions de fois ce que l'on peut réaliser en laboratoire. L'inconvénient de l'étude des rayons cosmiques par rapport à celle des particules provenant des accélérateurs est leur relative rareté. Il n'y a en effet aucune comparaison entre le nombre de particules que l'on peut obtenir à la sortie d'un accélérateur et ce que l'on peut recueillir par hasard des rayons cosmiques.

Roland Omnès.

PASCAL (Blaise) page 292.

(Viollet)
Blaise Pascal

Mathématicien, physicien et philosophe français, né à Clermont-Ferrand en 1623, mort à Paris en 1662.
L'œuvre et la personne de Pascal sont fondamentales dans l'histoire de la pensée humaine, scientifique, philosophique et religieuse. Pourtant, si le philosophe et le polémiste religieux sont universellement connus et estimés, le savant l'est parfois moins.
Génie fort précoce, Pascal compose à onze ans un traité des sons, et à seize ans un essai sur les coniques.
En 1652, il invente une machine arithmétique qui est en quelque sorte la première machine à calculer. Rencontrant Descartes, il s'oppose à sa théorie sur le vide et publie peu après ses expériences personnelles en ce domaine. Il a alors l'idée de faire une démonstration irréfutable de la pression atmosphérique en mesurant la hauteur du mercure au pied et au sommet d'une montagne : c'est la célèbre expérience du puy de Dôme (1648). Pour en confirmer le résultat, il la refait à la tour Saint-Jacques de Paris. Poursuivant des recherches sur le baromètre, il fait également de nombreuses observations sur la statique des fluides. Son apport le plus original dans cette branche de la physique est le principe sur la transmission des pressions par les liquides, principe qui porte son nom. Après un séjour à Port-Royal et un retour très vif à la religion, Pascal reprend en 1654 ses recherches scientifiques. Outre ses œuvres mathématiques, il se tourne vers des questions plus pratiques, fonde les « carrosses à cinq sols », première entreprise de transport en commun à Paris. Il entre alors dans la polémique janséniste puis il se consacre uniquement à l'apologie de la religion chrétienne.
A la fois passionné par la science et réticent devant elle (peut-être par peur de s'y laisser entraîner de façon exclusive), Pascal a le grand mérite de la libérer d'un dogmatisme trop poussé.

Bibliographie :

De l'équilibre des liqueurs et de la pesanteur de la masse de l'air (Gauthier-Villars, Paris, 1956) ;
Expériences nouvelles touchant le vide (Margat, Paris, 1647) ;
Œuvres complètes (Gallimard, Paris, 1962).

PASCAL (Pascal) page 484.

Unité. Le pascal (Pa) est le nom donné en France à l'unité de pression du système international, le newton, par mètre carré (N/m²).
La pression atmosphérique vaut sensiblement 100 000 pascals. Le pascal est une unité assez mal adaptée aux pressions usuelles. C'est pourquoi on utilise l'hectopièze (hpz) ou bar, qui vaut précisément 100 000 pascals.

PAULI (Wolfgang) pages 103, 350, 428.

(Keystone)
Wolfgang Pauli

Né à Vienne en 1900, mort à Zürich en 1958.
Professeur de physique théorique en Suisse, en Allemagne et aux États-Unis, Pauli reçoit le prix Nobel de physique en 1945. Alors qu'il est encore étudiant, il expose magistralement la théorie de la relativité et inaugure ainsi une brillante carrière en physique atomique. Créateur de la théorie quantique des champs, il énonce le principe d'exclusion qui porte son nom et d'où dérivent l'interprétation de la valence et l'impénétrabilité de la matière. Il est en outre le premier, avec

Fermi, à affirmer l'existence des neutrinos (1931), théorie qui sera confirmée ultérieurement par l'expérience. Enfin, c'est lui qui introduit la notion de moment magnétique du noyau et qui observe le paramagnétisme des radicaux ♦.

♦ Radicaux chimiques : molécules incomplètes ayant en général une faible durée de vie.

Ouvrages essentiels :

Kolloidchemie der Eiweisskörper (Steinkopff, Dresden, 1920) ;
Relativitätstheorie (1921) ;
Meson Theory and Nuclear Forces (Interscience Publishers, New York, 1946) ;
Exclusion Principle and Quantum Mechanics (Ed. du Griffon, Neuchâtel, 1947) ;
Continuous Groups in Quantum Mechanics (Conseil européen pour la recherche nucléaire, Genève, 1956) ;
Aufsätze und Vorträge über Physik und Erkenntnistheorie (Vieweg und Sohn, Brünswick, 1961) ;
Collected Scientific Papers (Wiley and Sons, New York, 1964).

PAULI (Principe d'exclusion de) : voir Exclusion

PAULING (Échelle de)

Les travaux de Pauling ♦ sur la liaison chimique l'ont amené à classer les éléments suivant leur aptitude à donner des ions positifs ou négatifs, autrement dit, suivant leur électropositivité, un élément étant d'autant plus électropositif qu'il donne facilement un ion positif. Cette échelle permet de prévoir certaines réactions, mais aussi de déterminer le caractère ionique ou covalent d'une liaison chimique.

♦ Linus Pauling, né en 1901, chimiste américain. Auteur d'importants travaux sur la nature de la liaison chimique et les macromolécules. Prix Nobel de chimie (1954) et de la paix (1962).

PENDULE (Pendulum) pages 267, 270, 305.

Corps mobile autour d'un axe, pouvant prendre des oscillations autour de cet axe, sous l'action de forces tendant à le ramener à sa position d'équilibre.
Le mouvement étant périodique, les oscillations du pendule ont fourni un moyen de mesure du temps.

Pendule de Foucault

Expérience célèbre, réalisée par Foucault au Panthéon pour montrer la rotation de la Terre (on peut en voir une réplique au palais de la Découverte).

PÉRIODE-PÉRIODIQUE (Period-Periodical) pages 45, 61, 216, 224, 257, 268, 272, 330, 445, 448, 478, 497, 498, 510, 519.

Lorsqu'un phénomène se reproduit identiquement à lui-même au bout d'intervalles de temps égaux, ce phénomène est périodique. Par exemple, le cycle lunaire (28 jours environ) est un phénomène périodique, de même que les oscillations d'un pendule.
On donne le nom de période au temps s'écoulant entre deux passages consécutifs du système dans le même état, autrement dit, la durée d'une oscillation ou vibration.

PÉRIODE RADIOACTIVE (Radioactive period) pages 488, 498, 523, 528.

Une substance radioactive se désintègre de différentes manières ♦. Mais, dans tous les cas, les noyaux atomiques du corps radioactif disparaissent petit à petit. On appelle période radioactive le temps nécessaire pour que la moitié des noyaux initialement présents se soient désintégrés. Les substances radioactives ont des périodes variables.

♦ Se reporter à l'article : l'Atome, pages 61 et 62.

En voici quelques exemples :
uranium ^{238}U : 4,5 milliards d'années ;
radium ^{226}Ra : 1 590 ans ;
radon ^{222}Rn : 3,8 jours ;
radium E $^{214}Ra_E$: $1{,}5 . 10^{-4}$ seconde.

PÉRIODIQUE (classification) : voir Classification et tableau page 42

PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE (Magnetic permeability)

pages 192, 199, 308.

Les formules de l'électromagnétisme dans le vide font intervenir un coefficient μ_0, qu'on appelle perméabilité magnétique du vide. Ainsi, l'induction magnétique créée par un conducteur rectiligne indéfini à une distance r du conducteur a pour expression, dans le système international d'unités :

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I}{r},$$

où B est en teslas ♦, I en ampères, r en mètres.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, pages 13 et 14.

Dans le système international, on pose (c'est un choix arbitraire), $\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7}$ (ce n'est pas le seul choix possible ; le système électromagnétique C.G.S. était basé sur le choix : $\frac{\mu_0}{4\pi} = 1$).

Dans un milieu matériel, l'induction B′ créée par un courant (ou un aimant) est différente de l'induction B dans le vide, créée dans les mêmes conditions. Le rapport $\frac{B'}{B} = \mu_r$ est la perméabilité relative du milieu.

μ_r est de l'ordre de 1 pour la plupart des substances, sauf pour les substances ferromagnétiques ou ferrimagnétiques. Dans ce cas, μ_r varie avec B. Voici quelques valeurs des maximums :
fer doux : $\mu_r = 15\,000$;
acier ordinaire : $\mu_r = 4\,000$.
Certains alliages ont une perméabilité énorme ♦ : le supermalloy (fer, nickel, molybdène) a une perméabilité maximale de 800 000...

♦ De tels alliages sont utilisés pour la réalisation d'électro-aimants ou d'appareillage destiné à la recherche.

Relation entre perméabilité μ_0 et permittivité du vide ϵ_0
L'étude du champ électromagnétique a conduit Maxwell à considérer perméabilité et permittivité du vide comme des grandeurs qui ne sont pas indépendantes. Les équations de propagation du champ électromagnétique conduisent à la formule de Maxwell, valable dans tous les systèmes d'unités : $\varepsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$, où c est la vitesse de la lumière, vitesse de propagation du champ électromagnétique.

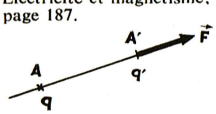
PERMITTIVITÉ ♦ (Permittivity) pages 187, 257, 446.

♦ Se reporter à l'article : Électricité et magnétisme, page 187.

Lorsqu'on écrit que la force f s'exerçant entre deux charges q et q' à la distance r dans le vide s'exprime par la formule :

$$f = \frac{1}{4\pi\,\varepsilon_0} \cdot \frac{qq'}{r^2},$$

on fait intervenir le coefficient ε_0, qui est la permittivité du vide, et qui vaut, dans le système international, $8{,}85 . 10^{-12}$ ♦.



♦ Dans l'ancien système « électrostatique C.G.S. », on prenait $4\pi\,\varepsilon_0 = 1$.

Dans un milieu matériel isolant, la force s'exerçant entre les 2 charges q et q' est plus faible que dans le vide, toutes choses égales par ailleurs. On écrit alors : $f = \frac{1}{4\pi\,\varepsilon_0\,\varepsilon_r} \cdot \frac{qq'}{r^2}$, où ε_r est la permittivité relative du milieu.

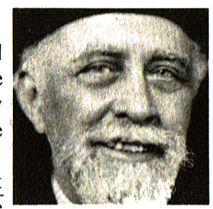
En voici quelques valeurs : air (sec ; 1 atm.) : 1,00058 ; soufre : 4,1 ;
pétrole : 2,1 ; eau : 80.
mica : 8 ;

On utilise les corps à forte permittivité relative pour la fabrication de condensateurs ◆. Du fait de sa permittivité élevée, l'eau affaiblit suffisamment les forces électrostatiques pour rompre les liaisons ioniques. La dissolution d'un corps comme le sel marin (chlorure de sodium NaCl) s'accompagne ainsi d'une ionisation. L'eau est un « solvant ionisant ».

◆ Voir ce mot.

PERRIN (Jean) pages 177, 196, 283, 288.

Physicien français, né à Lille en 1870, mort à New York en 1942.
Professeur à la faculté de Paris, Perrin contribue à la fondation du Centre national de la recherche scientifique et crée le palais de la Découverte. Sous-secrétaire d'État à la Recherche scientifique en 1936, il se rend ensuite à New York pour y diriger l'Université française. Membre de l'Académie des sciences, il reçoit le prix Nobel de physique en 1926.
Les recherches de Perrin sont surtout centrées sur les colloïdes, le mouvement brownien et la détermination des poids moléculaires absolus. C'est au cours de ses travaux qu'il confirme expérimentalement les études théoriques d'Einstein sur l'existence des atomes. Pionnier en divers domaines, il est le premier à établir expérimentalement que les rayons cathodiques ◆ sont constitués de corpuscules d'électricité négative (1895), à assimiler l'atome à un système solaire en miniature (1901) et à observer que la perte d'énergie subie par la matière au cours de la transformation de l'hydrogène en hélium permet de rendre compte du rayonnement solaire. Enfin, il se penche sur les phénomènes de fluorescence et, pendant la Première Guerre mondiale, sur le problème du repérage par le son ◆.


Jean Perrin (Viollet)

◆ Voir l'article : Électricité et magnétisme, page 195.

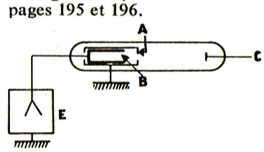
◆ Voir l'article : l'Électronique, pages 246 à 249.

Ouvrages essentiels :
Traité de chimie physique (Gauthier-Villars, Paris, 1903).
Le Mouvement brownien (A. Colin, Paris, 1910).
Les Éléments de la physique (A. Michel, Paris, 1929).
Grains de matière et de lumière (Hermann, Paris, 1935).
L'Organisation de la recherche scientifique en France (Hermann, Paris, 1938).
A la surface des choses (Hermann, Paris, 1940-1941).
Les Atomes (P.U.F., Paris, 1948).
La Science et l'espérance (P.U.F., Paris, 1948).

PERRIN (Expérience de Jean) page 196.

Cette expérience, réalisée en 1895, a montré que les « rayons cathodiques ◆ » étaient chargés négativement. Ce résultat devait conduire à l'hypothèse de l'électron, grain élémentaire d'électricité négative.
Jean Perrin envoya un faisceau de rayons cathodiques émis par C dans un cylindre B relié à l'électroscope E (le cylindre B est protégé des actions extérieures par un autre cylindre A relié au sol). Il constata alors que l'électroscope, préalablement chargé positivement, se déchargeait, par suite de l'apport des charges négatives neutralisant les premiers.

◆ Voir l'article : Électricité et magnétisme, pages 195 et 196.



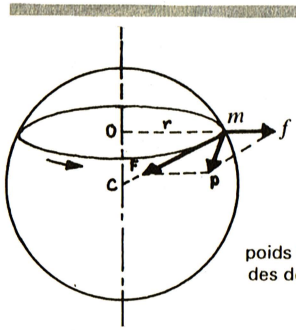
PESANTEUR (Gravity) pages 100, 187, 274, 285, 305, 324, 421, 479.

Un corps placé dans l'environnement d'une planète — ou de tout autre corps céleste — est soumis à des forces dont la résultante est le poids de ce corps. On peut considérer ce poids comme le résultat de l'action, sur ce corps, d'un champ, qui est le champ de pesanteur.
Pour un corps de masse m, à la surface de la Terre, la force principale s'exerçant sur ce corps est la force de gravitation. Supposons la Terre sphérique de rayon R et de masse M ; cette force a pour intensité : $F = G\frac{Mm}{R^2}$, G étant la constante universelle de gravitation ($G = 6{,}67.10^{-11}$ unité du système international). Elle est dirigée vers le centre de la Terre. Mais la Terre tourne et, de ce fait, la masse m est soumise à une force centrifuge qui tend à lui faire quitter le sol. Si ω est la vitesse de rotation de la Terre et r le rayon du cercle décrit par la masse m, cette force f vaut : $f = m\omega^2 r$, elle est dirigée suivant Om.
Le poids P est la résultante ♦ de ces deux forces et n'est donc pas rigoureusement dirigé vers le centre de la Terre.

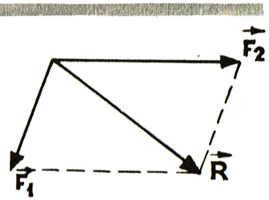
♦ Voir figure ci-dessous.

Cela correspond à une « accélération de la pesanteur », vecteur ♦ $\vec{g}$ défini par la relation $P = m\vec{g}$, donc de même direction et même sens que $\vec{P}$. On comprend alors que l'intensité de la pesanteur, c'est-à-dire du vecteur $\vec{g}$, soit différente suivant la latitude : aux pôles, où la force centrifuge est nulle, g vaut 9,83 m/s². A Paris, $g = 9{,}81$ m/s². A l'équateur, la force centrifuge est maximale : $g = 9{,}78$ m/s².

♦ Voir : Aperçu mathématique, page 17.



poids P : résultante des deux forces

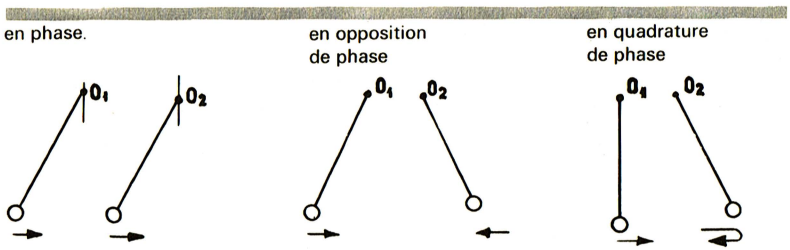


résultante de deux forces : force définie par la diagonale du parallélogramme construit avec, pour côtés, les vecteurs représentant $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$

PHASE (Phase) pages 220, 225, 311, 323, 390 à 395, 489.

En physique

Grandeur servant à repérer l'état d'un système en vibration par rapport à un autre. Prenons des exemples : deux balanciers oscillent avec la même période (horloges bien réglées). S'ils passent ensemble par leur position d'équilibre, dans le même sens, on les retrouvera en même temps à l'écart maximal, etc. On dit qu'ils vibrent « en phase ». Une troupe de soldats marchant au pas représente une collection d'oscillateurs en phase... Poursuivons cette dernière comparaison. Si un soldat part du pied droit, contrairement aux autres, tout se passe comme s'il avait une demi-oscillation de retard: il est en « opposition de phase » avec les autres. C'est aussi le cas de nos deux balanciers si l'un est lancé vers la gauche en même temps que l'autre l'est vers la droite. Ils ont alors une demi-période d'écart l'un avec l'autre.



Si le retard de l'un était de 1/4 de période, il passerait à sa position d'équilibre lorsque le second est à son écart maximal ; le premier est en « quadrature retard » avec le second (ou le second en quadrature avance...).
Si on peut définir la phase relative de deux oscillateurs, on dira que ces oscillateurs sont cohérents ; cette notion de cohérence est très importante en optique : le but du laser est précisément d'obtenir des vibrations cohérentes.

En chimie
On appelle phase une partie homogène d'un système chimique : deux liquides miscibles constituent une phase. Il en est de même de un ou de plusieurs gaz. Un mélange d'huile et d'eau (non miscibles) est constitué de deux phases liquides. Sauf cas particuliers (certains alliages), dans un mélange de plusieurs solides, on doit considérer autant de phases que de corps purs.

PHONE (unité) : voir Son

PHONON (Phonon) pages 141, 486, 510.

Quasi-particule imaginée pour rendre compte de l'effet de l'agitation des atomes d'un cristal sous l'action de la température. Du fait des forces de liaison importantes existant entre les différents atomes, les oscillations d'un atome se transmettent aux voisins, et ainsi de suite, de proche en proche.
L'onde d'agitation se propage dans le solide comme une onde sonore, d'où le nom de phonon donné au quantum d'énergie, quasi-particule dont le rôle est d'assurer le transfert d'énergie d'un atome à l'autre.

PHOSPHORESCENCE (Phosphorescence) pages 82, 166, 326, 331.

Réémission, par une substance irradiée par une radiation de courte longueur d'onde (lumière, rayons X ou gamma), d'une lumière de plus grande longueur d'onde, cette émission pouvant se prolonger notablement après l'excitation (dans le cas contraire, il s'agit de luminescence). La phosphorescence, comme la luminescence, est due au passage des électrons des atomes à un état excité ♦. En revenant sur leur niveau fondamental, ils émettent un photon lumineux produisant le phénomène observé.

♦ Voir l'article : l'Atome, page 39.

PHOTOÉLECTRONIQUE (ou Photoélectrique) (Effet) (Photoelectronic effect) pages 37, 98, 177, 210, 229, 235, 290, 312, 314, 324, 331, 416, 417, 418, 451, 452, 512, 527.

Émission d'électrons par un corps, sous l'action d'une lumière incidente dont les photons sont suffisamment énergétiques ♦.

♦ Voir Cellule photoélectrique.

PHOTOGRAPHIE (Photography) pages 263, 304, 310, 328, 338, 345, 351, 408, 440, 441, 451, 452, 490, 498, 503, 506, 508, 512, 527.

Production d'images sur une pellicule sensible à l'action de la lumière. Art et science à la fois, la photographie nous intéresse ici comme une application de l'optique et pour la chimie des réactions se produisant dans les émulsions ♦.

♦ Émulsion : gélatine contenant un sel d'argent sensible à la lumière.

Dans un appareil photographique, lorsqu'on « presse le bouton », l'obturateur, ouvert pendant un court instant, laisse pénétrer à travers l'objectif un faisceau lumineux dans la chambre noire, où se trouve la surface sensible contenant, en général, du bromure d'argent.

Au développement, on fait agir un révélateur, qui réduit à l'état d'argent les parties de bromure d'argent qui ont été excitées par la lumière. L'argent étant opaque, ces parties apparaissent noires : on sait qu'un négatif traduit en blanc les parties sombres de l'objet, et inversement. Ce révélateur est donc un réducteur, faisant passer Ag^+, ion argent, à l'état d'argent métallique Ag. Puis la fixation dissout le bromure non impressionné.

Le développement d'une photographie en couleurs est plus complexe. Il fait intervenir, outre le réducteur, des produits « chromogènes » donnant, avec les constituants des émulsions, des colorants fournissant les trois couleurs fondamentales, dont la combinaison restitue, en général assez fidèlement, les couleurs de l'objet.

Perfectionnement de la photographie

Les progrès vont actuellement dans deux directions : amélioration des émulsions et perfectionnement des appareils. On réalise des émulsions dont la sensibilité est telle qu'on peut photographier en noir et blanc des scènes de nuit sans autre éclairage que l'éclairage public d'une rue, par exemple (il est plus difficile d'obtenir des résultats identiques dans la photographie en couleurs).

Quant aux appareils, leurs perfectionnements ont porté sur la qualité des objectifs : les couches antireflets ♦ permettent d'augmenter le nombre des lentilles et d'améliorer la qualité de l'image, même aux grandes ouvertures. Mais la tendance actuelle est à l'automatisation, et la mesure du temps de pose et du diaphragme est de plus en plus confiée à une cellule photoélectrique ou, plus exactement, photoconductrice.

♦ Le traitement antireflets consiste à déposer sur la surface des lentilles une très faible épaisseur de fluorure de calcium, détruisant par un phénomène d'interférences les rayons pouvant se réfléchir sur la surface des lentilles.

Il reste la photo en relief intégral ou holographie ♦, susceptible dès maintenant d'applications intéressantes.

♦ Voir ce mot et l'article : l'Optique, pages 404 à 406.

PHOTOMÉTRIE (Photometry) pages 319, 335, 528.

Partie de l'optique mesurant les effets d'une source lumineuse sur un récepteur, qui est en général l'œil ou une cellule photoélectrique. Une source de lumière émet de l'énergie rayonnante. L'énergie reçue sur une surface dépend non seulement de la source, mais de sa distance à la surface, ainsi que de l'orientation de celle-ci par rapport à la source. L'énergie reçue est mesurée en watts/cm² ♦, mais cette mesure n'a qu'un lointain rapport avec l'effet sur l'œil car la sensibilité de l'œil n'est pas la même pour les différentes couleurs du spectre visible.

♦ Voir Tableau des symboles et unités, pages 13 et 14.

Source étalon

Il faut d'abord définir une source étalon, c'est-à-dire une source émettant une lumière de composition spectrale déterminée, et de surface également fixée. Cette source est constituée par 1 cm² d'oxyde de thorium (bonne approximation du corps noir), portée à une température de 1 763° C (fusion du platine).

Cette source permet de définir l'intensité lumineuse I. Dans une direction perpen-

diculaire à sa surface, la source précédente émet une intensité qui est, par définition, de 60 candelas (cd), unités du système international (ce qui rappelle l'ancienne unité, la « bougie »).

Le flux lumineux

φ est défini par la relation $I = \frac{d\varphi}{d\Omega}$ ou $\frac{\Phi}{\Omega}$, où Ω (ou $d\Omega$) est un angle solide ♦, mesuré en stéradians, φ est mesuré en lumens (lm).

Donc $\varphi_{(lm)} = I_{(cd)} \cdot \Omega_{(sr)}$.

Une surface S reçoit un flux lumineux φ. Il en résulte un éclairement E mesuré par le flux reçu par unité de surface : $E = \frac{\varphi}{S}$. Dans le système international, l'unité d'éclairement est le lumen par m² ou lux (on utilise quelquefois le phot = 1 lm/cm²).

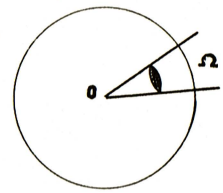
Intéressons-nous à la source.

Une même intensité lumineuse ne produit pas le même effet suivant qu'elle est émise par une source ponctuelle (arc électrique) ou étendue. C'est la raison pour laquelle on définit la luminance L, quotient de l'intensité lumineuse I par la surface S de la source (ou sa projection sur un plan perpendiculaire à la direction d'observation). L'unité internationale est le nit :

$$L_{(nit)} = \frac{I\ (cd)}{S\ (m^2)}.$$

Ainsi, une bougie de stéarine a une luminance de $0{,}5 . 10^{-4}$ nit et le Soleil 15 stilbs.

♦ Si on considère une sphère et un cône dont le sommet est le centre de la sphère, le cône découpe sur la sphère une surface S. On appelle angle solide la grandeur $\Omega = \frac{S}{4\pi\ R^2}$ où $4\ \pi\ R^2$ est la surface de la sphère. Tout l'espace représente donc un angle de 4π stéradians (le stéradian étant l'unité d'angle solide ainsi défini).



Les mesures photométriques se ramènent à des mesures d'éclairement. Elles se font en général par comparaison de l'éclairement fourni par une source étalon avec celui de la source étudiée (car l'œil est incapable de comparer deux éclairements perçus successivement).

L'efficacité lumineuse mesure le rendement de la source lumineuse. Elle dépend du spectre émis : une source peut émettre une énergie considérable, mais correspondant à un flux lumineux nul si cette énergie est émise en dehors du spectre visible. L'efficacité maximale est atteinte au maximum de sensibilité de l'œil, pour la lumière jaune (longueur d'onde $\lambda = 0{,}55\ \mu$). Elle est alors de 690 lumens par watt. Celle du Soleil est de 90 lm/W, environ.

PHOTOMULTIPLICATEUR (Photomultiplier) pages 139, 319.

Appareil qui a permis d'améliorer considérablement les performances des lunettes et télescopes, et donné naissance à de nombreux appareils aussi divers que des caméras électroniques ou des compteurs de particules.

Principe du photomultiplicateur

Le premier photomultiplicateur fut réalisé par Zworykin en 1936 : un photon, tombant sur une surface métallique convenable (photocathode), provoque l'émission par effet photoélectronique d'un électron. Cet électron accéléré est envoyé sur une autre surface analogue, où il produit l'émission de plusieurs électrons (2 à 5). Rien n'empêche d'accélérer à nouveau ces électrons et de réaliser, après passage sur plusieurs électrodes successives, un flux de dix millions (ou plus) d'électrons. On traduit ainsi la lumière sous forme d'un courant électrique.

Si on envoie les électrons obtenus sur un écran fluorescent, on réalise un amplificateur de brillance ; on peut ainsi, en recevant une image très faible sur une photocathode, transformer cette image en une autre beaucoup plus brillante sur

un écran fluorescent. Ces amplificateurs de brillance sont utilisés dans des domaines très différents : de la radioscopie au tir de nuit.
Dans le télescope électronique de Lallemand, l'image finale se forme non pas sur un écran, mais sur une pellicule photographique. Les photographies obtenues marquent, en finesse et en sensibilité, un progrès très appréciable sur les méthodes habituelles.

PHOTON (Photon) pages 37, 46, 85, 87 96, 97, 99, 101, 102, 139, 143, 172, 173, 212, 218, 229, 264, 270, 274, 275, 288, 291, 296, 312, 321, 326, 331, 335, 337, 358, 363, 413, 416 à 419, 420, 422, 423, 429, 431, 434, 437, 438, 439, 440, 449, 451, 452, 461, 481, 482, 485, 487, 490, 495, 508.

Particule élémentaire, qu'on associe à une vibration électromagnétique comme la lumière.
L'hypothèse du photon est très postérieure à celle des vibrations lumineuses. Max Planck, pour expliquer le rayonnement du corps noir et la répartition des différentes longueurs d'onde dans le spectre de ce rayonnement, avait été conduit à admettre une quantification de l'énergie : l'énergie rayonnée ou absorbée ne pouvait l'être que par quantités finies, multiples d'une valeur constante h. Pour un rayonnement de fréquence ν l'énergie l'est par « quanta », de valeur $w = h\nu$ (h est la constante de Planck, qui vaut $6{,}62.10^{-34}$ joule/seconde).
Einstein, en 1905, expliqua l'effet photoélectronique par l'intervention de ces grains d'énergie, qui sont précisément les photons. On ne peut parler de masse du photon, puisqu'il se déplace à la vitesse de la lumière. Il est complètement caractérisé par son énergie. Le photon a un spin égal à 1 (c'est donc un boson).

PHOTOPILE — CELLULE PHOTOCONDUCTRICE (Photocell) pages 450, 453.

Les amateurs de photographie connaissent bien cet instrument, appelé souvent, de façon impropre, « cellule photoélectrique ». La photopile utilise le fait qu'un élément comme le sélénium, placé dans le circuit figuré ci-dessous, provoque, lorsqu'il est éclairé, un courant dont l'intensité est variable avec l'éclairement (d'où l'utilisation en photographie comme posemètre).
Dans la version moderne, on utilise des semi-conducteurs comme le sélénium : on réalise deux zones, l'une positive, l'autre négative, par un dopage convenable. Sous l'action des photons lumineux, le nombre des porteurs de charge (électrons ou trous) augmente. Il en résulte un courant circulant dans le sens $p \longrightarrow n$ à l'extérieur de la cellule ♦.
L'application la plus importante de ces cellules est la réalisation de batteries solaires ♦ utilisées sur les véhicules spatiaux.

♦ Voir Semi-conducteurs, Jonction.

♦ Batterie solaire : source d'énergie où des photopiles recevant la lumière solaire fournissent de l'énergie électrique utilisée pour alimenter les appareils d'un laboratoire automatique, par exemple.

PIÉZOÉLECTRICITÉ (Piezoelectricity) pages 320, 328, 342, 486, 498, 527.

Lorsqu'on soumet une lame de quartz ♦ à une pression, il apparaît des charges électriques sur les faces soumises à la pression. C'est l'effet piézoélectrique, étudié par Pierre et Jacques Curie.

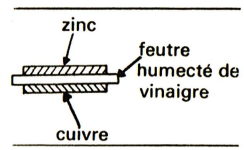
♦ Voir Quartz.

Ce phénomène est à la base d'applications importantes : microphones et têtes de lecture piézoélectriques pour électrophones, mesure des contraintes (pressions ou extensions) et stabilisation des oscillateurs radio.

PILE (Battery)

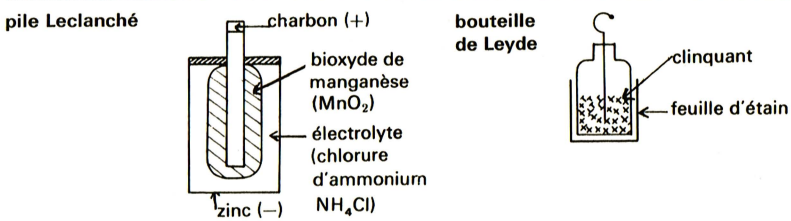
pages 44, 65, 69, 124, 145, 189, 191, 204, 238, 252, 266, 272, 314, 328, 342, 348, 357, 358, 453, 474, 475, 492, 501, 515, 536.

Ces générateurs, de forme et de caractéristiques si variables d'un modèle à l'autre, constituent la première source d'électricité vraiment utilisable.
En 1799, Volta réalise un empilement de rondelles de zinc et de cuivre, séparées par des rondelles de feutre imbibées d'eau salée ou vinaigrée, qui « produit des effets comparables à celles d'une bouteille de Leyde ♦ presque déchargée ». Outre l'explication du nom de pile, les expériences de Volta nous montrent la production d'un courant dans un circuit contenant une chaîne dissymétrique ♦ de conducteurs. C'est un phénomène général. Les piles (ce mot étant pris au sens habituel du terme) sont des chaînes dissymétriques de conducteurs comprenant des électrolytes et dont l'énergie électrique tire son origine dans les réactions chimiques se produisant dans la pile.



♦ Bouteille de Leyde : bouteille remplie de clinquant et recouverte extérieurement d'une feuille d'étain.
Cela constitue un condensateur qui, mis en contact avec une machine électrostatique, se charge et peut à la décharge fournir des étincelles... et des secousses désagréables.

♦ La chaîne cuivre/sulfate de zinc/cuivre est symétrique.
Au contraire, la chaîne charbon/chlorure d'ammonium/zinc est dissymétrique.
Selon le sens du courant, l'ordre des conducteurs rencontrés est le même dans la chaîne symétrique, et différent dans la chaîne dissymétrique.



Prenons un exemple : la pile Leclanché, dont le nom est celui de l'inventeur avant d'être celui d'une marque commerciale.
La chaîne à considérer est : charbon / NH_4Cl (chlorure d'ammonium) / zinc
⊕ ⊖

L'existence de la dissymétrie entre charbon et zinc produit une force électromotrice d'environ 1,5 volt.
Lorsque le courant passe, le zinc passe à l'état d'ions zinc : Zn^{++}.
Mais l'électrolyse produit de l'hydrogène au voisinage du charbon ; c'est le phénomène de « polarisation » qui fait baisser la tension aux bornes de la pile. Le rôle du bioxyde de manganèse, qui est un oxydant, est de combattre cette polarisation en oxydant l'hydrogène produit.
On trouvera une disposition analogue dans tous les types de pile : deux électrodes différentes, le métal le plus électropositif servant de pôle — (c'est le métal qui émet le plus facilement des électrons) et un oxydant assurant la dépolarisation au voisinage du pôle +.
Dans d'autres piles (piles à 2 liquides), la polarisation est évitée par la nature même de la pile. C'est le cas de la pile Daniell :

zinc / sulfate de zinc / sulfate de cuivre / cuivre
⊖ / $ZnSO_4$ / $CuSO_4$ / ⊕

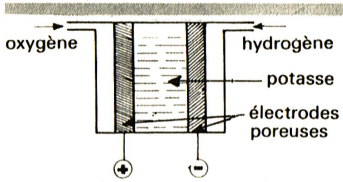
Le passage d'un courant dans un tel système ne peut produire d'hydrogène.
Nous avons dit que toute chaîne dissymétrique pouvait être le siège d'une force électromotrice. Il existe en effet des piles autres que des piles électrochimiques : les photopiles en sont un exemple, ainsi que les couples thermoélectriques.

PILE ATOMIQUE ou NUCLÉAIRE : voir Réacteurs

et les pages 71 à 75, 259.

PILE A COMBUSTIBLE (Fuel battery)

C'est un cas particulier des piles électrochimiques. Dans une pile ordinaire, le métal du pôle négatif s'ionise : c'est un processus d'oxydation. De même, au pôle positif apparaissent des atomes d'hydrogène ou de métal aux dépens des ions correspondants. Il y a donc réduction. Une pile est ainsi le siège de réactions d'oxydo-réduction, d'où l'idée d'utiliser des électrodes à gaz, permettant d'apporter au pôle + de l'oxygène et au pôle — le combustible, l'hydrogène, par exemple. L'idée date de 1830. Elle est due à Grove. Ce n'est qu'en 1947 que fut réalisée par Davtyan la première pile à hydrogène. Deux électrodes poreuses permettent d'envoyer les gaz et de les mettre en contact avec l'électrolyte. De plus, ces électrodes portent un catalyseur favorisant les réactions. Au niveau de l'électrode à hydrogène, celui-ci passe à l'état d'ion H^+, libérant un électron. Avec les ions OH^- de la potasse, il se combine pour donner de l'eau.
Au niveau de l'électrode à oxygène, celui-ci capte deux électrons et s'ionise en ions O_2^{--} qui, par l'intermédiaire de la formation d'eau oxygénée (H_2O_2), produit des ions OH^-.



Finalement, on part d'hydrogène et d'oxygène, et on aboutit à l'eau. Or cette réaction dégage de l'énergie (apparaissant sous forme de chaleur lors de la combustion de l'hydrogène). La pile à combustible la fait apparaître directement sous forme d'énergie électrique. On a cherché à utiliser d'autres combustibles, tels que le méthane, et aussi des liquides tels que l'alcool méthylique. Le principe reste de récupérer, sans l'intermédiaire de la machine thermique au rendement limité par le principe de Carnot, l'énergie de la réaction d'oxydation.
Il semble que la mise au point de piles à combustible commercialisables présente des difficultés qui ne sont pas encore complètement résolues, malgré des applications intéressantes dans le domaine spatial.

PILE PISCINE

Type de réacteur nucléaire dans lequel le cœur de la pile (c'est-à-dire les barres de combustible nucléaire) plonge dans une masse d'eau ordinaire (et non d'eau lourde) qui sert à la fois de réfrigérant et de modérateur ♦.
La disposition de ces réacteurs les rend commodes pour la recherche, par la facilité qu'ils offrent pour l'introduction dans le cœur de substances ou d'appareils de mesure divers.
La pile Siloé, du Centre d'études nucléaires de Grenoble, est de ce type.

♦ Voir l'article : l'Atome, pages 71 à 75.

(Keystone)
Max Planck

PLANCK (Max) pages 34, 37, 143, 182, 288, 331, 361, 363, 452.

Physicien allemand, né à Kiel en 1858, mort à Göttingen en 1947.
Professeur aux universités de Munich, de Kiel puis de Berlin, président du Kaiser

Wilhelm Institut (qui prendra ultérieurement son nom), Planck obtient le prix Nobel de physique en 1918.
La grande œuvre de Planck est sa formulation de la théorie quantique, véritable révolution dans la physique moderne. Dès 1897, il réussit à appliquer les deux premiers principes de la thermodynamique à la thermochimie et à l'électrochimie. Poursuivant alors des recherches sur la radiation de la chaleur, et en particulier sur le rayonnement du corps noir, il expose en 1900 la loi de la radiation et les conséquences théoriques de celle-ci : l'hypothèse de la discontinuité de l'énergie et la définition des quanta.
Il s'efforce alors de coordonner avec la théorie classique le « quantum *h* ». Devant son échec répété, il comprend la nécessité d'adopter de nouvelles méthodes de calcul, que Schrödinger développera par la suite. Adhérant sans réserve à la théorie de la relativité dès qu'Einstein la formule, il s'attaque par ailleurs au positivisme ♦ et poursuit ses travaux en thermodynamique.
Orientant de plus ses recherches vers les problèmes de la connaissance et de l'esprit, Planck reste jusqu'à la fin de sa vie, malgré les douloureuses épreuves qu'il traverse, un défenseur absolu de la paix et un exemple de courage et d'honnêteté.
L'œuvre de Planck a été décisive pour la physique, puisqu'elle marque le début de la physique quantique.

♦ Théorie d'Auguste Comte. L'esprit humain, la société passent par trois âges : théologique, métaphysique, positif. Les sciences positives se constituent en rupture avec les deux premiers âges. Comte classe les sciences en mathématique, astronomie, physique, chimie, biologie, sociologie, chacune prenant pour base la précédente et accédant à un plus haut niveau de complexité (ainsi chimie et biologie).

Ouvrages essentiels :

Leçons de thermodynamique (Hermann, Paris, 1913) ;
La Nature de la lumière (Blanchard, Paris, 1927) ;
Électromagnétisme (Alcan, Paris, 1939) ;
Initiations à la physique (Flammarion, Paris, 1941) ;
Autobiographie scientifique et derniers écrits (A. Michel, Paris, 1960) ;
L'Image du monde dans la physique moderne (Gonthier, Paris, 1963) ;
Das Princip der Erhaltung der Energie (Teubner, Leipzig, 1887) ;
Zur Dynamik bewegter Systeme (Barth, Leipzig, 1908) ;
Die Stellung der neueren Physik zur mechanischen Naturanscheinung (Vogel, Leipzig, 1910) ;
Determinismus oder Indeterminismus? (Barth, Leipzig, 1938) ;
Akademie-Ansprachen (Akademie-Verlag, Berlin, 1948) ;
Vorträge und Erinnerung (Hirtzel, Stuttgart, 1949) ;
Scheinprobleme der Wissenschaft (Barth, Leipzig, 1952) ;
Der Kausalbegriff in der Physik (Barth, Leipzig, 1953) ;
Religion und Naturwissenschaft (Barth, Leipzig, 1953) ;
Sinn und Grenzen der exakten Wissenschaft (Barth, Leipzig, 1953) ;
Vom Wesen der Willensfreiheit (Barth, Leipzig, 1953) ;
Physikalische Abhandlungen und Vorträge (Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1958) ;
Theorie der Wärmestrahlung (Barth, Leipzig, 1966).

PLANCK (constante de) (Planck's constant) pages 34, 177, 265, 277, 288, 331, 334, 346, 355, 363, 485, 491.
Constante de quantification de l'énergie, introduite pour la première fois par Planck dans l'étude du rayonnement du corps noir. La constante de Planck vaut $6{,}62.10^{-34}$ unités du système international.

PLASMAS voir l'article pages suivantes et les pages 79, 255, 269, 273, 334, 442.

La physique des plasmas

par André Samain

Les gaz qui nous sont familiers (l'air, la vapeur d'eau...) sont constitués de molécules, consistant elles-mêmes en des noyaux entourés par un cortège d'électrons. Chaque électron a une charge électrique négative déterminée, tandis que chaque noyau a une charge positive, qui est multiple de la charge de l'électron. Les molécules d'un gaz à la température ordinaire sont électriquement neutres, c'est-à-dire qu'elles contiennent exactement le nombre d'électrons nécessaires pour compenser la charge des noyaux. Dans ces conditions, les forces électriques qu'elles s'appliquent mutuellement sont très faibles. Elles se comportent dans le gaz comme des boules de billard cheminant en ligne droite, sauf lorsqu'elles viennent à se choquer de plein fouet ou à heurter les parois du récipient qui contient le gaz.

Les molécules d'un gaz ont normalement un mouvement désordonné qu'on appelle «agitation thermique». Ce mouvement est étroitement lié à la température du gaz. En fait, la température du gaz mesure l'énergie du mouvement désordonné de chaque molécule. Si on augmente cette température, les collisions entre les molécules sont de plus en plus violentes. Celles-ci tendent alors à se briser en molécules plus légères, puis en atomes simples contenant un seul noyau.

Si le gaz est chauffé à une température encore supérieure, les atomes qui le constituent, à leur tour, tendent à perdre leurs électrons. Ces électrons «libres» circulent dans le gaz sans être attachés à un atome particulier. Les atomes «épluchés» sont appelés des ions (positifs, car ils ont une charge électrique globale positive). Un gaz où existent en abondance des ions et des électrons libres s'appelle un plasma.

Presque toute la matière de l'Univers est à l'état de plasma, que ce soit la matière dense et très chaude qui forme les étoiles ou la matière ténue et relativement froide qui remplit l'espace intersidéral.

André Samain, né le 30 avril 1931, ancien élève de l'École normale supérieure, il effectue au Commissariat à l'énergie atomique (Fontenay-aux-Roses) des travaux sur la physique des plasmas (canons à plasma, ondes de choc, mécanique des particules, études sur les instabilités, stabilisation, chauffage).
André Samain a rédigé cet article avec la collaboration de MM. Aymar et Koechlin.

Dans quelques endroits privilégiés seulement — en particulier la Terre —, la matière n'est pas un plasma: elle peut s'organiser en molécules et, éventuellement, en êtres vivants. La Terre est d'ailleurs entourée par un plasma très ténu, l'ionosphère, qui s'étend de 100 à 1 000 km d'altitude environ.

Il ne faudrait pas déduire de ce qui précède que la physique des plasmas est la science de tout l'Univers: rien ne serait plus inexact. En fait, la physique des plasmas ne s'occupe que d'une très petite classe de plasmas. C'est là un point assez difficile à expliquer: la différence entre un plasma et un gaz ordinaire vient de ce que les particules libres d'un plasma sont électriquement chargées. Elles s'appliquent donc mutuellement des forces électriques et magnétiques. Elles sont, aussi, sensibles aux actions électriques et magnétiques exercées de l'extérieur du plasma. Le champ de la physique des plasmas est constitué par les plasmas où ces phénomènes électriques et magnétiques sont dominants. Cette délimitation exclut presque toute la matière de l'Univers, à savoir les plasmas denses situés à l'intérieur des étoiles, qui sont dominés par d'autres phénomènes, par exemple la gravitation universelle. En fait, les plasmas naturels relevant vraiment des méthodes de la physique des plasmas sont les plasmas peu denses qu'on trouve autour des étoiles et autour des planètes.

La « fusion nucléaire contrôlée » constitue l'application principale de la physique des plasmas

Ces plasmas naturels n'ont d'ailleurs qu'une part restreinte dans la motivation de la recherche en physique des plasmas. Depuis l'origine, celle-ci s'est surtout développée pour ses applications. Par exemple, la connaissance des lois des décharges électriques dans le gaz était nécessaire pour réaliser les réseaux modernes de distribution d'énergie électrique où des tensions de plusieurs centaines de kilovolts sont appliquées entre des conducteurs dans l'air. Ces travaux ont eu aussi comme application les tubes luminescents destinés à l'éclairage et les tubes à gaz de forte puissance comme les ignitrons◆. Mais ce n'est que depuis 1950 que la physique des plasmas connaît un grand essor, quand il est apparu que la maîtrise de l'état plasma de la matière était la condition de base pour résoudre un des problèmes technologiques les plus intéressants que l'humanité se soit posés. Ce problème, la «fusion nucléaire contrôlée», consiste à libérer de façon «contrôlée» (c'est-à-dire industriellement utilisable) l'énergie de fusion nucléaire libérée de façon «explosive» dans la bombe H. Sa solution, qui mettra à la disposition des hommes, sans risque de pollution, de l'énergie en quantité quasi illimitée sera une des grandes réussites de notre civilisation technique. L'énergie de fusion nucléaire apparaît lorsque 2 noyaux légers (par exemple 2 noyaux de deutérium, contenant chacun un neutron et un proton) se rencontrent et se fondent ensemble pour constituer des noyaux

◆ Les ignitrons sont des tubes utilisés pour transformer industriellement le courant alternatif en courant continu.

plus lourds (comme l'hélium, formé de 2 protons et de 2 neutrons). Ces réactions sont un peu analogues aux réactions chimiques qui prennent place dans le feu ordinaire, où un atome de carbone, par exemple, et un atome d'oxygène fusionnent ensemble pour produire une molécule d'oxyde de carbone ou de gaz carbonique. La différence est que dans le «feu nucléaire» le réarrangement qui résulte de la réaction intéresse les protons et les neutrons des noyaux, alors que dans le «feu chimique» ce réarrangement concerne seulement les cortèges électroniques qui entourent les noyaux. Comme les forces qui lient ensemble les protons et les neutrons dans les noyaux sont beaucoup plus intenses que celles qui agissent sur les électrons des atomes ou des molécules, les réactions de fusion nucléaire fournissent beaucoup plus d'énergie — par gramme de carburant consommé — que les réactions chimiques: environ 10 000 000 de fois plus. Malheureusement elles sont beaucoup plus difficiles à exploiter. Si le feu chimique peut être allumé dans des foyers à une température de l'ordre de 1 000° K◆, la fusion nucléaire nécessite des foyers où la matière réagissante est portée à des températures énormes, de l'ordre de 100 000 000° K. A ces températures, le milieu réagissant est un plasma entièrement ionisé, c'est-à-dire formé uniquement de noyaux et d'électrons libres. La maîtrise de tels foyers «thermonucléaires», comme on les appelle, est actuellement un des aspects les plus vivants de la physique des plasmas.

◆ 1 000 °K = 1 000 — 273 = 727 °C.
Voir explications à Thermomètre, page 517.

Le phénomène de base de la physique des plasmas: l'organisation des particules...

Une caractéristique de la physique des plasmas est qu'elle est «non fondamentale», en ce sens que les phénomènes qu'elle étudie — bien qu'ils existent avec leur originalité et leurs généralités propres — sont composés d'un très grand nombre de phénomènes élémentaires qui, eux, ne posent plus depuis longtemps de problème scientifique. Expliquons-nous sur ce point: un plasma est formé d'un très grand nombre de particules chargées, exerçant les unes sur les autres des forces parfaitement connues. Le mouvement de chacune de ces particules sous l'action de ces forces constitue aussi un problème complètement résolu dans son principe. Le comportement d'un plasma est donc le résultat de lois élémentaires rigoureusement établies. Cela est tellement vrai que l'on peut prédire, dans certains cas particulièrement simples, le comportement d'un plasma en calculant le mouvement de chacune de ses particules individuelles à l'aide d'un ordinateur rapide. Cependant, de la multitude des phénomènes élémentaires connus relatifs à chaque particule, émergent des organisations d'ensemble du plasma qui constituent des phénomènes nouveaux et intéressants.

Les particules d'un plasma organisé, au lieu d'avoir des positions et des vitesses distribuées tout à fait au hasard, ont tendance à se rassembler dans certaines régions de l'espace ou à se diriger préfé-

rentiellement dans certaines directions. Cette tendance peut être continue dans le temps, ou au contraire peut varier au cours du temps. Il est très important qu'elle ne soit pas incompatible avec l'agitation thermique des particules. En fait, elle se superpose à cette agitation thermique.

Les plasmas thermonucléaires constituent un exemple de plasmas ainsi organisés. Ces plasmas posent un problème d'isolement thermique: comment empêcher, en effet, les particules qu'ils contiennent d'aller perdre leur énergie d'agitation thermique considérable sur les parois de l'enceinte matérielle qui les entoure nécessairement? Cet isolement thermique est possible grâce à des champs magnétiques imposés de l'extérieur du plasma par des bobinages parcourus par des courants électriques. De tels champs permettent d'emprisonner les particules dans une zone située à l'intérieur de l'enceinte matérielle. Les particules ont une agitation thermique très importante: elles se déplacent extrêmement rapidement dans tous les sens. Mais, au lieu d'avoir des trajectoires rectilignes comme en l'absence de champ magnétique, elles ont, en présence d'un tel champ, des trajectoires courbes qui les font rester indéfiniment dans la même région de l'espace. On conçoit qu'un plasma formé de particules ainsi «confinées» n'ait pas de contact avec son environnement matériel et soit donc isolé thermiquement de cet environnement.

...cause et effet d'un champ électromagnétique présent dans le plasma

Dans ces plasmas confinés, l'organisation des particules résulte d'une action extérieure judicieusement choisie: le champ magnétique créé par les bobinages extérieurs au plasma. En fait, des champs électriques et magnétiques peuvent être créés dans le plasma par les particules elles-mêmes. Chaque particule crée autour d'elle un champ électrique et un champ magnétique. Si les particules ont des positions et des vitesses distribuées au hasard, c'est-à-dire si elles ne sont pas du tout organisées, ces champs individuels se neutralisent à peu près en chaque point de l'espace, et ils ont finalement une action négligeable sur le comportement du plasma. Cependant, si les particules sont un peu organisées — par exemple, si elles ont tendance à être plus nombreuses dans telle région que dans telle autre —, les champs individuels créés par chaque particule ne se neutralisent plus. Il apparaît alors en chaque point du plasma un champ électromagnétique déterminé qui, en retour, influence les particules. Il peut également influencer leur organisation. Ce mécanisme constitue la base de la physique des plasmas: d'une part, les particules s'organisent sous l'influence d'un champ électromagnétique et, d'autre part, cette organisation crée ou contribue à créer ce champ. Il est à l'origine des régimes d'oscillations ou des mouvements instables que nous examinerons plus loin.

LA PHYSIQUE DES PLASMAS

La première question qui se pose quand on considère un plasma concerne son «degré d'ionisation»: quelle proportion de particules électriquement chargées contient-il? Nous avons dit précédemment que cette proportion augmentait quand on élevait la température du gaz. En fait, la proportion de particules chargées dans un plasma résulte d'un équilibre entre deux sortes de collisions entre particules: d'une part, les collisions qui créent des ions et des électrons libres à partir des atomes ou des molécules et, d'autre part, les collisions qui rassemblent de nouveau les ions et les électrons libres en des atomes ou des molécules. Si on augmente la température du gaz, l'agitation thermique des particules augmente et les collisions «ionisantes», qui sont d'autant plus probables que les particules se heurtent avec plus de violence, deviennent plus nombreuses que les collisions «désionisantes». Le gaz se transforme alors en plasma.
La température où s'effectue la transition gaz-plasma est généralement assez élevée. Elle dépend surtout de la densité du gaz, c'est-à-dire du nombre de particules qu'il contient par cm^3: elle est d'autant plus élevée que le gaz est plus dense. Par exemple, l'atmosphère terrestre contient environ 3.10^{19} molécules d'azote et d'oxygène par cm^3. Il faudrait la chauffer à 20 000 °K pour la transformer en plasma. Cependant, l'ionosphère terrestre, qui contient seulement 10^6 particules par cm^3, est déjà un plasma à quelques milliers de degrés K. Il en est de même de la matière intersidérale, qui contient quelques particules par cm^3, à quelques centaines de degrés K. Au contraire, la matière très dense à l'intérieur des étoiles (typiquement 10^{27} particules par cm^3) nécessite des températures de l'ordre du million de degrés K (largement atteintes en réalité) pour être ionisée.

On peut obtenir un plasma au laboratoire en réalisant une décharge électrique dans un gaz...

Une difficulté pour créer un plasma au laboratoire, vient de ce que sa température (de l'ordre de quelques milliers de degrés K) ne peut généralement pas être supportée par l'enceinte matérielle qui le contient: il faut donc réussir à chauffer le plasma sans chauffer cette enceinte. Le moyen le plus simple pour y parvenir consiste à soumettre le gaz que l'on veut transformer en plasma à une décharge électrique, en y insérant par exemple deux pièces de métal (électrodes) entre lesquelles on applique une tension électrique. Il apparaît alors dans le gaz un champ électrique.
Imaginons qu'un électron libre soit présent initialement◆. Sous l'action du champ électrique, cet électron prend de la vitesse. A un moment donné, son énergie est suffisante pour arracher un électron à une molécule neutre. Il ionise cette molécule, créant ainsi un ion et un nouvel électron libre. Il existe alors dans le gaz deux électrons libres qui en produiront chacun deux autres, etc. Ce processus mul-

◆ Il en existe toujours quelques-uns, même à la température ordinaire.

tiplicatif est très efficace; au bout de cinquante générations, par exemple, l'électron initial aura produit 10^{15} électrons; cela signifie qu'il peut ioniser considérablement n'importe quel gaz neutre. Notons que la décharge électrique réalise un chauffage du plasma. Les électrons libres gagnent dans le champ électrique de l'énergie qui apparaît finalement sous la forme d'agitation thermique. Au contraire, les molécules neutres, parce qu'elles n'ont pas de charge électrique, sont insensibles au champ électrique. Elles ne gagnent pas d'énergie et restent «froides», c'est-à-dire sans agitation thermique notable. Les tubes luminescents employés pour l'éclairage contiennent un gaz faiblement ionisé créé de cette façon. Ce gaz consiste en une population ténue d'électrons libres chauds (10^{11} particules par cm^3 à quelques milliers de degrés K) mélangés à une population égale d'ions et à une population beaucoup plus dense de molécules neutres froides (10^{16} particules par cm^3, pratiquement à la température ordinaire). Les électrons chauds «excitent» continuellement les molécules neutres qui, en perdant leur énergie d'excitation, émettent les photons qui forment le flux lumineux disponible.

...et en isolant le plasma de l'enceinte matérielle qui l'entoure à l'aide d'un champ magnétique

On peut penser améliorer les «performances» du plasma obtenu dans un tube luminescent (par exemple, le nombre d'électrons libres qu'il contient et leur énergie) en augmentant la puissance de la décharge électrique. En réalité, cette méthode n'est pas bonne, car l'énergie fournie au plasma se retrouve en grande partie sur le tube dont la température devient très vite insupportable. Il est beaucoup plus rentable d'essayer d'isoler le plasma du tube. Expliquons comment on peut procéder dans le cas concret que nous considérons.

L'idée consiste à faire régner dans le tube un champ magnétique dirigé dans le sens de la longueur du tube, c'est-à-dire dont les «lignes de force»◆ sont parallèles à la direction du tube. Si le champ magnétique est suffisamment intense, les particules chargées du plasma sont en quelque sorte collées aux lignes de force: elles

◆ Les lignes de force d'un champ magnétique sont des lignes idéales qui suivent en chaque point la direction du champ.

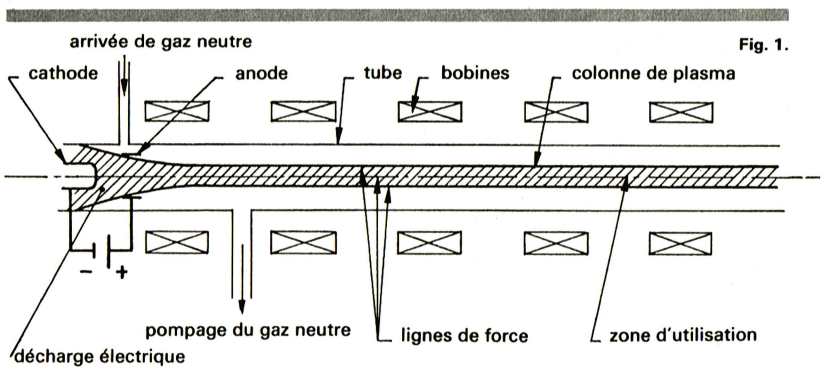


Fig. 1.

décrivent une spirale serrée autour de ces lignes dans le cas présent. Il leur est alors impossible d'aller se perdre sur les parois du tube. Bien entendu, elles peuvent encore se perdre aux extrémités du tube, mais, si celui-ci a une longueur suffisante, cette perte peut ne pas être trop importante. Dans le dispositif schématisé (fig. 1), la décharge électrique est réalisée à une extrémité du tube, le plasma formé diffusant sans pertes transversales le long des lignes de force du champ magnétique vers la région où il sert à l'expérimentation. Au contraire, le gaz neutre introduit au niveau de la décharge diffuse dans le tube sans être guidé par le champ magnétique. Il peut être pompé par des orifices ménagés dans la paroi du tube, et ainsi éliminé avant d'arriver dans la zone d'expérimentation. De cette manière on obtient des plasmas d'hydrogène complètement ionisés contenant 10^{11} particules par cm^3 à une température de 10 000 °K. Ces colonnes de plasma, comme on les appelle, sont constamment utilisées pour l'expérimentation des phénomènes de base.

Comme nous l'avons vu précédemment, ces phénomènes de base consistent essentiellement en des comportements organisés du plasma: pour peu que le mouvement des particules ne se fasse pas complètement au hasard, qu'elles soient un peu «organisées», elles sont capables de coopérer pour créer en chaque point un champ électrique et un champ magnétique déterminés. En retour, ces champs sont capables de modifier l'organisation des particules. Ce mécanisme se traduit concrètement sous forme d'oscillations ou de mouvements instables.

Un exemple de comportement organisé: l'oscillation à la « fréquence plasma »

Considérons, par exemple, dans un plasma un petit domaine. Donnons-lui un nom: D. Supposons qu'initialement le nombre d'électrons dans D soit inférieur au nombre correspondant d'ions. C'est une «organisation» des particules. Elle se traduit par la présence dans D d'une charge électrique positive, puisqu'il manque un certain nombre d'électrons de charge négative. Cette charge crée un champ électrique dirigé vers l'extérieur de D et attire les électrons dans D (fig. 2 [1]). Ce champ tend donc à modifier l'organisation initiale des particules. Il tend ici à combler le déficit initial de D en électrons; il y parvient au bout d'un certain temps, et finit même par créer un excès d'électrons dans D (fig. 2 [2]). Plus tard, cet excès se transforme de nouveau en déficit, etc. Un plasma est ainsi apte à soutenir à chaque point une oscillation de ses particules. Cette oscillation se fait à une cadence déterminée, qui ne dépend que de la densité du plasma et qu'on appelle la «fréquence plasma».

La «fréquence plasma» joue aussi un rôle important pour déterminer le comportement d'un plasma vis-à-vis d'une onde électromagnétique, du genre de celles émises par les émetteurs radio, télévision ou radar. Une telle onde a elle-même sa propre fréquence,

qui est la cadence d'oscillation des champs électrique et magnétique qui la constituent. Quand on envoie une onde électromagnétique sur un plasma, si sa fréquence est supérieure à la «fréquence plasma» du plasma, elle traverse librement ce dernier. Dans le cas contraire, elle ne peut pas pénétrer dans le plasma et est réfléchie par lui. C'est ainsi que les ondes émises par les émetteurs radio, dont la fréquence est assez faible, sont réfléchies vers la Terre par l'ionosphère terrestre. Cette circonstance permet l'écoute radiophonique hors de la vision directe de l'émetteur. Au contraire, les ondes de télévision (qui transportent plus d'informations) ont une fréquence plus forte. Elles traversent librement l'ionosphère. Seule la réception en vision directe est alors possible. C'est la raison pour laquelle les chaînes de télévision sont obligées de disposer de «relais» au sol ou sur satellites.

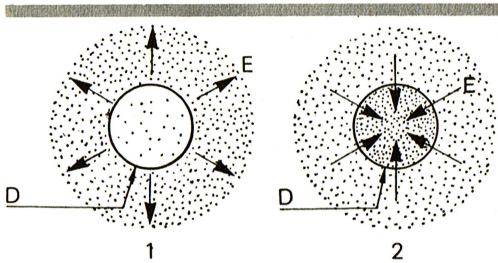


Fig. 2.

Oscillation de la densité électronique à la fréquence plasma. Dans la situation (1) des électrons manquent dans le domaine D. Il apparaît de ce fait un champ électrique E qui leur donne une vitesse vers D. Le déficit initial se trouve ainsi comblé, et au-delà dans la situation (2). Finalement, le nombre d'électrons dans D oscille à une certaine fréquence plasma.

Les oscillations à la «fréquence plasma» sont un exemple parmi beaucoup d'autres des modes d'oscillation possibles dans un plasma. Si le plasma est chaud et s'il est immergé dans un champ magnétique statique (qui, lui, est constant dans le temps), comme c'est souvent le cas, ces modes d'oscillation sont très nombreux et couvrent une gamme de fréquence très étendue. Donnons un autre exemple: nous avons dit précédemment que les particules chargées d'un plasma où règne un champ magnétique intense étaient «collées» aux lignes de force de ce champ. Ces dernières, chargées par la matière que constituent les particules, se comportent comme des tendeurs en corde à piano◆. Dans l'état normal, ces tendeurs «raidissent» le plasma, l'empêchant en particulier de s'écouler dans les directions transversales. Mais elles peuvent aussi avoir des «vibrations». Les oscillations correspondantes du plasma ont reçu le nom de «magnéto-hydrodynamique», car elles sont étudiées mathématiquement par des équations décrivant la dynamique d'un fluide (*hydro*) en présence d'un champ magnétique.

◆ Corde à piano : fil d'acier.

L'amortissement des oscillations est dû : soit aux chocs entre particules...

Le fait que des modes d'oscillations puissent exister dans un plasma signifie qu'il peut exister un champ électromagnétique ayant une certaine structure, oscillant à une certaine fréquence, qui produise une organisation des particules capables en retour de le faire exister.

Tout cela ne représente qu'une situation potentielle: pour que le mode d'oscillation existe réellement, il faut encore l'exciter, c'est-à-dire agir sur le plasma pour créer le «début» de l'oscillation (dans le cas de l'oscillation à la fréquence plasma [fig. 2], nous avons supposé qu'à l'instant initial il existait un déficit d'électrons, dans un domaine du plasma). Supposant que l'oscillation ait ainsi commencé, on peut se poser la question de savoir si elle durera éternellement au niveau initial, si elle va s'éteindre ou, au contraire, s'amplifier. En général, l'oscillation tend à s'éteindre, d'une façon plus ou moins rapide. Une oscillation dans un plasma représente, en effet, une certaine quantité d'énergie. Une partie de cette énergie est l'énergie des champs électrique et magnétique qui conduisent l'oscillation. Le reste est l'énergie cinétique de la composante du mouvement des particules qui est organisée, c'est-à-dire qui est conduite par les champs électrique et magnétique. Supposons que les particules subissent des collisions les unes avec les autres. Lors d'une collision, une particule «oublie» en grande partie son histoire antérieure et notamment la composante organisée de son mouvement. L'énergie associée à cette composante, qui était une partie de l'énergie du mode d'oscillation, est donc perdue pour celui-ci. De collisions en collisions, l'oscillation perd ainsi son capital initial d'énergie: en d'autres termes, elle s'amortit.

...soit à un transfert d'énergie de l'oscillation aux particules résonantes

Si le plasma est peu dense, les collisions entre les particules sont rares et l'effet d'amortissement que nous venons de décrire est peu important. Dans ce cas, les oscillations du plasma peuvent encore être amorties par un autre mécanisme, plus subtil, découvert par le physicien russe Landau en 1948. C'est un phénomène de résonance. Dans un plasma, en l'absence de toute oscillation et que nous supposerons confiné, une particule a ses habitudes: elle passe et repasse dans chaque région de l'espace à une certaine cadence. Une oscillation du plasma fait apparaître en chaque point un champ électromagnétique qui possède aussi sa propre cadence (la fréquence de l'oscillation). Si cette cadence est différente de la cadence du mouvement de la particule, celle-ci subira en général une influence modérée du champ. Au contraire, si la fréquence de l'oscillation est égale ou presque égale à la cadence du mouvement de la particule, celle-ci sera très influencée par le champ électromagnétique de l'oscillation. Les particules de ce type sont dites «résonantes». A la longue, le mouvement des particules résonantes est tellement influencé par le champ oscillant qu'elles en viennent à oublier quelle était leur histoire avant que débute l'oscillation; elles finissent en particulier par avoir toutes la même énergie. Cette énergie commune est la moyenne des énergies de toutes les particules résonantes avant l'oscillation. Comme nous allons le voir, cette circonstance peut être une cause d'amortis-

sement pour l'oscillation. Supposons, en effet, qu'il y ait avant l'existence de l'oscillation un plus grand nombre de particules résonantes de faible énergie que de particules résonantes d'énergie plus forte. L'oscillation, ramenant l'énergie de toutes les particules résonantes à la moyenne de leurs énergies avant l'oscillation, accélère les particules résonantes lentes et ralentit les rapides. Dans le cas présent, l'oscillation a plus de particules lentes à accélérer que de rapides à ralentir. Elle doit donc céder de l'énergie aux particules résonantes. Elle prélève cette énergie sur son capital initial : elle s'amortit.

Inversement, l'oscillation peut être amplifiée au détriment des particules résonantes

Nous débouchons ici sur un des nœuds de la physique des plasmas. Nous disposons de deux informations, la première étant qu'un très grand nombre de modes d'oscillation sont possibles dans un plasma, et la seconde qu'une oscillation déterminée est amortie si les particules résonantes de faible énergie sont plus nombreuses que les particules résonantes de plus forte énergie. Cette situation est réalisée pour la plupart des modes d'oscillation d'un plasma. Il peut arriver cependant que, pour certaines oscillations, la situation inverse se produise (plus de particules résonantes rapides que de particules résonantes plus lentes). Dans ce cas, bien entendu, le raisonnement que nous avons tenu plus haut peut être repris — *mutatis mutandis* — en concluant cette fois que l'oscillation reçoit de l'énergie des particules résonantes au lieu d'en céder, qu'elle est donc amplifiée au lieu d'être amortie. Un tel mode d'oscillation est «instable». Dans un plasma où existe un mode d'oscillation instable, ce mode se développe jusqu'à ce que son amplitude soit assez élevée pour que l'état du plasma soit substantiellement modifié. Généralement le mode donne alors naissance à plusieurs autres modes, qui peuvent se multiplier à leur tour, etc. Le plasma dans son état final est alors le siège d'un régime complexe d'oscillations: on dit qu'il est turbulent. On peut faire apparaître très simplement dans une colonne de plasma◆ un mode d'oscillation instable. Dans une telle colonne, une oscillation du plasma peut être une onde se propageant le long de la colonne, avec une certaine vitesse. On concevra que les particules résonantes, étant des particules qui ressentent l'action de l'onde toujours dans le même sens, sont les particules dont la vitesse le long de la colonne est égale à la vitesse de propagation de l'onde. Si le nombre de particules résonantes plus rapides que l'onde est supérieur au nombre de particules résonantes moins rapides que l'onde, nous nous trouvons dans la situation où le mode d'oscillation considéré est instable. L'expérience peut être réalisée avec un faisceau d'électrons injecté le long de la colonne. Suivant que sa vitesse est inférieure ou supérieure à la vitesse de propagation de l'onde, celle-ci reste imperceptible ou au contraire «explose» jusqu'à un niveau d'excitation important.

◆ Du type de celle décrite page 462.

LES PLASMAS CHAUDS CONFINÉS

La température d'un milieu matériel, répétons-le, est la mesure de l'énergie d'agitation thermique des particules qui le constituent: à 100 millions de degrés, par exemple, les particules ont en moyenne une énergie de 10 000 *e*V◆, ce qui est énorme par rapport à l'énergie d'agitation thermique (moins de 1/10 *e*V) d'un milieu matériel à la température ordinaire. La cohabitation d'un plasma à 100 millions de degrés avec un environnement matériel à la température ordinaire constitue donc un formidable écart par rapport à l'équilibre thermodynamique; d'un autre côté, si l'on considère que, dans les grands accélérateurs de particules, on obtient des énergies de l'ordre de 10 milliards d'*e*V, ce problème de cohabitation semble avoir été résolu. En fait, le problème que pose la fusion contrôlée — celui qui nous intéresse — est très différent du problème que pose l'accélération des particules à de très hautes énergies. Il réside dans la conjonction de 3 exigences:

— Le plasma doit avoir une température se comptant en centaine de millions de degrés.

— Il doit être dense: contenir au moins 10^{14} particules par cm^3 au lieu de 10^5 particules par cm^3 dans un accélérateur. Cette différence est essentielle. Du fait de leur densité relativement élevée, les plasmas peuvent être le siège d'instabilités qui sont absentes dans un accélérateur. Notons incidemment que la pression développée par le plasma chaud (qui est proportionnelle au produit de sa température par le nombre de particules qu'il contient par cm^3) doit pouvoir se compter en kg/cm^2.

— Le plasma doit garder sa «chaleur», c'est-à-dire l'énergie d'agitation thermique de ses particules pendant un temps assez long, de l'ordre de la seconde. Pour les besoins de la fusion contrôlée, la performance demandée dépend de la densité du plasma. Elle est d'environ 1 seconde pour 10^{14} particules par cm^3, 1/10 seconde pour 10^{15} particules par cm^3, etc.

Précisons cette dernière exigence. Un plasma chaud dans un environnement à la température ordinaire a tendance à livrer sa chaleur à cet environnement. Ce qui est exigé est de diminuer ces pertes, de façon que le plasma, tout chauffage ayant été arrêté, conserve une même température pendant le temps mentionné plus haut.

Les pertes de chaleur normalement subies par un plasma sont essentiellement dues à deux mécanismes:

— l'émission de rayonnement électromagnétique, due au mouvement thermique des particules◆;

— la «conduction thermique», due au fait que les particules, par suite de leur agitation thermique, dispersent, à travers le plasma et jusque dans l'environnement matériel qui l'entoure, leur énergie d'agitation thermique.

◆ Voir tableau des symboles et unités, page 14.

◆ Elle est due plus précisément à l'accélération que subissent les particules quand elles ont une collision ou si elles tournent dans un champ magnétique.

Aux températures et aux densités que nous avons en vue, la conduction thermique est plus efficace que l'émission de rayonnement électromagnétique. L'agitation thermique des particules est telle en effet que, si on ne les arrête pas, elles ne mettent que quelques millionièmes de seconde pour atteindre les parois d'un dispositif pratique dont les dimensions sont de l'ordre d'une centaine de mètres. Il suffit de confronter ces quelques millionièmes de seconde à la seconde pendant laquelle le plasma doit conserver son énergie thermique pour arriver à la conclusion qu'il faut introduire dans ou autour du plasma un dispositif qui l'empêche de «toucher» son environnement matériel. Autrement dit, il faut «confiner» le plasma.

Pour être, un plasma chaud doit être confiné

En réalité, le fait pour un plasma chaud d'être confiné n'est pas seulement une des qualités qu'il doit avoir pour satisfaire aux exigences de la fusion contrôlée. C'est aussi la condition de sa création. Dans un dispositif où le problème du confinement est totalement résolu, les efforts que l'on déploie pour créer et chauffer le plasma sont rentables; de bonnes températures et de bonnes densités sont facilement atteintes. Par contre, un dispositif où le plasma est mal confiné est aussi difficile à remplir qu'un panier percé: les méthodes de chauffage les plus violentes (qui, d'ailleurs, par leur violence même dégradent encore le confinement) ne conduisent le plus souvent qu'à de piètres performances.

Un gaz ordinaire chaud dans un récipient froid a peu de pertes de chaleur par conduction thermique, du fait des collisions entre particules: par suite de ces collisions, les particules ont un mouvement en zigzag très embrouillé, qui les empêche de transporter leur énergie directement — et donc efficacement — vers les zones froides. Dans les plasmas que nous étudions et pour lesquels nous recherchons une isolation thermique presque parfaite, on ne peut pas compter sur ce mécanisme. Cela tient au fait qu'ils sont très chauds et pas très denses; les collisions entre particules n'y jouent alors pas un grand rôle: d'une part, chaque particule, à cause de son énergie considérable, ne dévie pas beaucoup de sa route lorsqu'elle rencontre une de ses compagnes; d'autre part, celles-ci ne sont pas très nombreuses. Il en résulte que chaque particule chemine pour son propre compte en étant très peu influencée par l'action individuelle des autres◆. Cela signifie qu'il ne faut pas compter sur les collisions entre particules pour limiter la conduction thermique. En fait, ce n'est pas bien grave: comme nous le verrons, il est possible d'appliquer aux particules, depuis l'extérieur du plasma, des forces qui les obligent à rester dans la zone de l'espace attribuée au plasma. En présence de ces forces, l'action des collisions n'est plus nécessaire pour diminuer la conduction thermique. Au contraire, les collisions ont maintenant un effet néfaste: elles font dévier les particules des trajectoires bien localisées qu'elles auraient en présence des seules

◆ Nous parlons ici de l'action individuelle d'une particule sur une autre, qui se manifeste lorsque les deux particules viennent au contact. Cela n'empêche pas du tout chaque particule d'être éventuellement très sensible aux champs électriques et magnétiques créés par des organisations d'ensemble intéressant des millions de particules, tels que le regroupement dans certaines régions de l'espace ou des vitesses préférentiellement orientées. Comme nous l'avons mentionné précédemment, ces organisations d'ensemble peuvent se présenter sous la forme d'instabilités qui, en fait, jouent un rôle de premier plan dans le confinement des plasmas.

forces appliquées de l'extérieur du plasma; elles tendent en réalité à dégrader le confinement du plasma dû à ces forces. Mais — et cette circonstance est très heureuse — elles ont en pratique une influence assez faible sur le mouvement des particules pour que les temps de confinement nécessaires de l'ordre de 1 seconde soient possibles.
Dans ces conditions, confiner le plasma, c'est confiner chacune des particules qui le constituent, c'est-à-dire la soumettre à des forces qui la maintiennent indéfiniment dans la même région de l'espace. Comment créer de telles forces? Dans les étoiles (exemple de plasma confiné), la pression du plasma est contenue par le champ de gravitation universelle créé par la masse énorme de l'étoile. Malheureusement, à notre échelle, ces forces sont complètement négligeables. On pourrait penser à un champ électrique. Mais un tel champ soumet des particules de charge opposée à des forces opposées; s'il confine les ions, par exemple, dans une zone donnée, il chassera les électrons hors de cette zone. Cela non plus ne convient pas. En fait, seule l'utilisation de champs magnétiques, créés, par exemple, par des bobinages extérieurs au plasma, permet de confiner un plasma chaud.

◆ Le mouvement de rotation d'une particule autour d'une ligne de force peut correspondre à une énergie cinétique considérable. L'extension de la spirale décrite par la particule est faible, mais le nombre des tours effectués par seconde est très grand, et la vitesse de la particule perpendiculairement à la ligne de force peut être très grande. Dans un plasma chaud confiné par un champ magnétique, l'énergie d'agitation thermique des particules se répartit ainsi : 2/3 de cette énergie pour le mouvement de rotation des particules autour des lignes de force, le 1/3 restant associé au mouvement des particules le long de ces lignes.

Un champ magnétique convenable permet d'emprisonner les particules d'un plasma

Nous nous sommes servis précédemment du concept de «ligne de force» d'un champ magnétique — ces lignes qui suivent en chaque point la direction du champ — et nous avons dit que, si le champ magnétique est suffisamment intense, une particule chargée décrit une spirale serrée autour d'une ligne de force, se trouvant ainsi comme collée à cette ligne de force◆. En immergeant un plasma dans un champ magnétique, on met donc ses ions et ses électrons comme sur des rails. Cela est un grand pas en avant vers leur confinement, mais encore faut-il que ces rails ne conduisent pas les particules vers l'environnement matériel du plasma qu'elles doivent éviter à tout prix.
Il y a deux méthodes pour résoudre ce problème. Nous n'en décrirons qu'une, la plus efficace◆. L'idée, au départ, est de s'arranger pour que les lignes de force forment des courbes fermées. Les particules sont alors obligées de les parcourir indéfiniment. Il faut cependant tenir compte de ce que les particules ne sont pas absolument fidèles à une ligne de force; elles ont tendance à glisser insensiblement d'une ligne de force à l'autre, d'une manière prévisible d'ailleurs par le calcul. On peut remédier à cet inconvénient par la manière dont les lignes de force sont refermées sur elles-mêmes. La disposition la plus efficace consiste à les enrouler sur ce qu'on appelle des «surfaces magnétiques» emboîtées les unes dans les autres (fig. 3). Chaque surface magnétique est une surface en forme de tore (la forme d'une chambre à air d'automobile bien gonflée). Chaque ligne de force s'enroule en hélice sur une surface magnétique en décrivant

◆ Dans la seconde méthode, on ne renferme plus les lignes de force sur elles-mêmes mais on oblige, en jouant sur des variations de l'intensité du champ magnétique, les particules à avoir un mouvement oscillant le long de ces lignes dans la région où le plasma doit être confiné. Ces « configurations magnétiques ouvertes » sont plutôt plus simples à construire et à exploiter que les configurations à surfaces magnétiques. Malheureusement, elles ne permettent de confiner que des plasmas ayant nettement moins d'énergie d'agitation thermique le long des lignes de force que dans chacune des directions perpendiculaires aux lignes de force. Ces plasmas non « isotropes » sont beaucoup plus perturbés par l'action des collisions et ont tendance à être plus instables que les plasmas confinés dans les configurations à surfaces magnétiques, qui sont, eux, isotropes. Leurs temps de confinement sont peut-être un peu courts pour les exigences de la fusion contrôlée.

sur elle, indéfiniment, à la fois des «grands» tours (autour de l'axe de la roue) et des «petits» tours (de la jante à la jante). Les diverses surfaces magnétiques s'emboîtent les unes dans les autres comme des pelures superposées, la plus intérieure se réduisant généralement à une ligne fermée qu'on appelle l'axe magnétique.

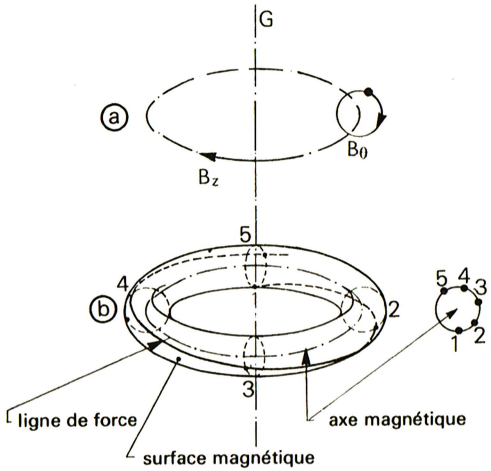


Fig. 3.
Une configuration à surfaces magnétiques est obtenue en superposant deux champs : un champ toroïdal B_Z, dont les lignes de force sont des cercles parallèles ayant le même axe G, et un champ méridien B_θ. Les lignes de force de la configuration s'enroulent alors indéfiniment sur des surfaces magnétiques en forme de tore.

On peut démontrer qu'une «configuration magnétique» de ce genre résout complètement le problème du confinement d'une particule, qui reste attachée à une surface magnétique déterminée, l'explorant dans toutes ses portions mais restant toujours très près de cette surface. Elle permet donc de confiner un plasma, dont la structure devra naturellement suivre la structure des surfaces magnétiques: sur chaque surface magnétique, sa température et sa densité seront constantes. En fait, un plasma confiné se composera de pelures successives — coïncidant avec les surfaces magnétiques — de moins en moins chaudes et de moins en moins denses quand on s'approche de l'environnement matériel, la température et la densité étant maximales sur l'axe magnétique◆.

Dans l'appareil Tokomak (fig. 4) sont représentés les éléments essentiels d'une configuration à surfaces magnétiques excellente: la configuration Tokomak a été mise au point par les physiciens de l'institut Kurchatov à Moscou◆. Un jeu de bobines crée un champ magnétique dont les lignes de force sont des cercles parallèles entre eux. Ce champ ne fait pas apparaître de surfaces magnétiques◆. On obtient les surfaces magnétiques en faisant circuler un courant électrique dans le plasma lui-même, qui, par suite de l'absence de collisions entre particules, constitue un excellent conducteur de l'électricité. Cette manière de créer les surfaces magnétiques différencie la configuration Tokomak de la configuration Stellarator inventée en 1956

◆ S'il est accessible au plasma, ce qui n'est pas toujours le cas (voir fig. 6).

◆ Entre 1958 et 1965.

◆ Le champ magnétiqu créé par le jeu de bobines ne vaut rien du point de vue du confinement, à cause du glissement insensible des particules d'une ligne de force à l'autre.

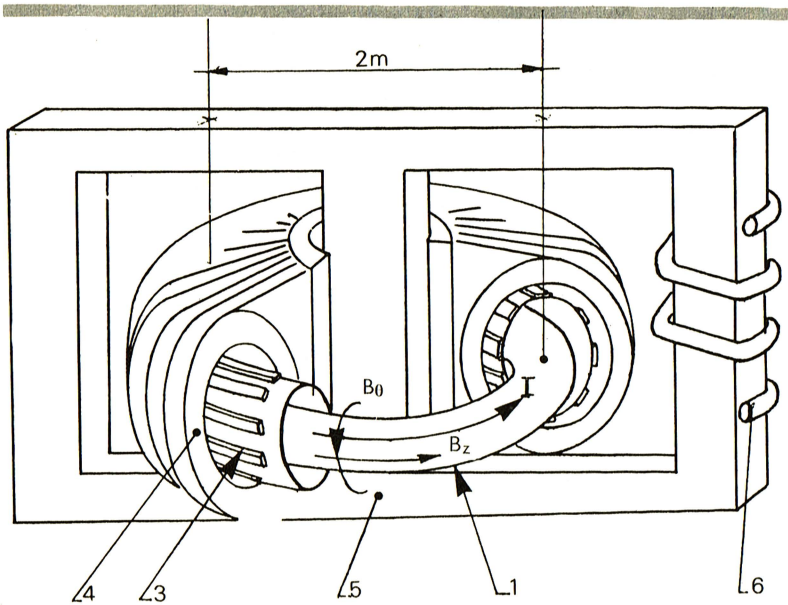


Fig. 4.
L'appareil Tokomak 3 (d'après L. Artsimovitch : cours donné à Saclay en 1967). Le plasma (1) est confiné dans une configuration à surfaces magnétiques. La composante B_Z (cf. fig. 3) du champ magnétique (40 000 gauss) est créée par les bobines (4) et la composante B_θ par un courant électrique I qui circule dans le plasma. Ce courant sert aussi à échauffer le plasma par effet Joule. Les barres (3) sont parcourues par des courants qui servent à centrer le plasma. Le courant I est introduit par le bobinage (6) *via* le circuit magnétique (5). La configuration Tokomak est un puits magnétique mais présente aussi un cisaillement magnétique modéré (voir page 472).

à l'université de Princeton, aux U.S.A. (fig. 5) et de la configuration Levitron (fig. 6) expérimentée à la même époque pour la première fois dans les laboratoires de la Commission de l'Energie atomique (A.E.C.) américaine à Livermore.

Avant de confiner un plasma, nombreux sont les obstacles technologiques à résoudre. Un dispositif de confinement nécessite un soin extrême dans la réalisation de toutes ses parties, que ce soit l'enceinte

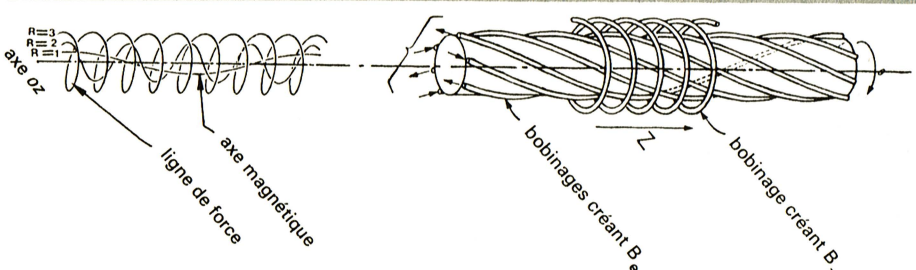


Fig. 5.
Dans les configurations Stellarator,
la composante B_θ (cf. fig. 3) du champ magnétique est créée par des bobinages hélicoïdaux parcourus par des courants de sens opposés.
Seulement une petite portion de la structure
– qui en fait se referme sur elle-même – a été représentée.
A droite : les bobinages.
A gauche : les lignes de force à diverses distances de l'axe magnétique.

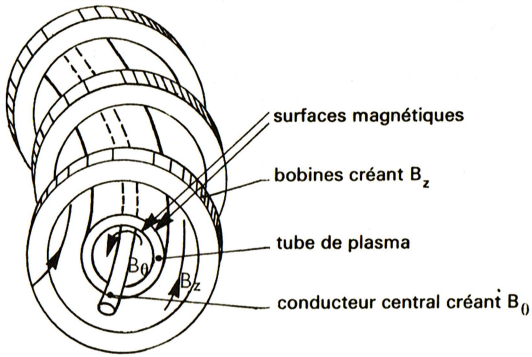


Fig. 6.
Dans les configurations à conducteur central, les surfaces magnétiques s'emboîtent autour de ce conducteur, qui est parcouru par un courant pour créer la composante magnétique B_0 (cf. fig. 3). Le plasma occupe des surfaces magnétiques à mi-chemin entre le conducteur central et des bobines créant la composante B_z. La configuration n'est pas un puits magnétique mais elle présente un cisaillement considérable. Le conducteur central doit « tenir tout seul », car il n'est pas question que des pièces matérielles traversent le plasma chaud pour le supporter. Il est donc « lévité », par exemple, par l'action du champ magnétique qu'il crée. D'où le nom de « Levitron » donné à cette configuration.

matérielle entourant le plasma ou les bobines créant les champs magnétiques intenses, etc. Le chauffage du plasma, qui doit être efficace et ne pas troubler le confinement, constitue également un problème important.

Les instabilités gênent le confinement des plasmas

Mais l'obstacle principal au confinement des plasmas chauds est d'une nature plus physique. Il consiste en la présence d'instabilités, se traduisant par la présence de champs électromagnétiques variables dans le temps et de forte amplitude. Il n'est plus question alors qu'une particule reste sagement collée à une ligne de force et à une surface magnétique. Sous l'action de ces champs, elle se déplace de façon aléatoire dans la configuration magnétique et elle atteint rapidement l'environnement naturel du plasma. Le confinement est perdu.

Ces instabilités traduisent le fait que certains modes d'oscillation du plasma tendent à s'amplifier au cours du temps. Le mécanisme d'amplification le plus fréquent, est une forme de l'effet Landau: les particules en résonance avec l'oscillation — celles qui la ressentent en cadence — quelle que soit leur position initiale, tendent sous son influence à se disperser uniformément dans l'espace. Cela veut dire que les particules situées initialement dans les zones intérieures du plasma — les plus nombreuses, par suite du confinement — se décalent vers l'extérieur, et inversement les particules moins nombreuses situées initialement dans les zones extérieures se décalent vers l'intérieur. Ces décalages s'accompagnent d'une variation de l'énergie des particules. Une instabilité apparaît s'ils font perdre de l'énergie aux particules qui se déplacent vers l'extérieur. En effet, ils font alors gagner — en moyenne, par particule — la même quantité d'énergie à celles qui se déplacent vers l'intérieur. Mais ces dernières, à cause du confinement, sont moins nombreuses. Finalement, plus de particules perdent de l'énergie que d'autres n'en

gagnent; de l'énergie se trouve donc libérée par les particules. Cette énergie est disponible pour amplifier l'oscillation.

Contre les instabilités: les puits magnétiques et le cisaillement magnétique

Pour réagir contre les instabilités, on peut lutter contre le mécanisme d'amplification lui-même en faisant en sorte que les particules, si elles sont décalées vers l'extérieur du plasma, aient tendance à gagner de l'énergie — et non à en perdre, comme ce doit être le cas pour que l'amplification ait lieu. On donne pour cela à la configuration magnétique une structure de «puits magnétique»: cette structure consiste dans le fait que l'intensité du champ magnétique est plus forte dans les zones extérieures du plasma que dans les zones intérieures. Dans ces conditions, une particule décalée vers l'extérieur se retrouve autour de sa nouvelle ligne de force avec un mouvement de spirale plus serré (puisque le champ magnétique y est plus intense) qu'il ne l'était avant son décalage. La particule a alors un comportement identique aux particules d'un gaz ordinaire, qui s'échauffe quand on le comprime: la particule va gagner de l'énergie. Cette méthode conviendrait pour supprimer dans le plasma toutes les instabilités causées par le confinement si cette compression était la seule cause déterminant la variation d'énergie de la particule lors de son décalage. Malheureusement ce n'est pas le cas. La structure de puits magnétique permet, cependant, d'éliminer une classe d'instabilités très nuisibles qui portent le nom de «flûtes»◆. Cet effet important a été mis en évidence de façon spectaculaire à l'institut Kurchatov à Moscou par Joffé en 1964: le même plasma (de très faible densité), confiné pendant 100 millionièmes de seconde à peine dans une configuration n'ayant pas la structure de puits magnétique, le devenait pendant une seconde si l'on donnait cette structure à la configuration.

◆ Ce nom leur a été donné en raison de la forme cannelée que prend le plasma quand ces instabilités se développent.

Il existe une autre méthode, très efficace également, pour lutter contre les instabilités. Elle consiste, cette fois, non pas à diminuer l'amplification éventuelle des modes d'oscillation du plasma, mais à empêcher l'existence même des modes d'oscillation susceptibles d'être amplifiés. La méthode repose sur le fait qu'un grand nombre de ces modes — pas tous malheureusement — ne peuvent exister que si les lignes de force enroulées sur les diverses surfaces magnétiques sont parallèles entre elles sur une grande longueur. Ce ne peut être le cas si les lignes de force qui sont enroulées comme des hélices sur les surfaces magnétiques ont sur les différentes surfaces des «pas◆» différents. Cette méthode a reçu le nom de «cisaillement magnétique», car les lignes de force tracées sur 2 surfaces magnétiques différentes ne sont pas parallèles entre elles.

◆ Le « pas » de cette hélice doit être compris ici comme le nombre de « grands tours » (voir page 468) que l'hélice doit faire pour réaliser un « petit tour ».

Il faut aussi noter que l'action des instabilités sur le confinement d'un plasma dépend de la taille du dispositif: plus celui-ci est grand, plus une particule du plasma soumise au champ électromagnétique

désordonné associé à l'instabilité met de temps à atteindre l'environnement. Cette considération est sans intérêt pour les instabilités fortes, qu'il faut absolument supprimer. Mais toutes les instabilités n'ont pas la même force. Il en est de très faibles, qui ne font apparaître que de faibles perturbations électromagnétiques dans le plasma; elles peuvent éventuellement être «tolérables», cela veut dire que le confinement souhaité peut être obtenu malgré leur présence, à condition que le dispositif soit assez grand.
Les puits magnétiques et le cisaillement magnétique ne permettent pas une stabilisation complète de tous les modes instables d'un plasma confiné. Ils ont cependant permis la réalisation d'excellents confinements. Les meilleures performances ont été obtenues sur les configurations Tokomak, qui sont des puits magnétiques et qui présentent du cisaillement magnétique. On y a confiné des plasmas de 10 millions de degrés K, contenant 3.10^{13} particules par cm^3 (développant une pression de 1/20 kg/cm^2) pendant 20 millisecondes. Ces performances sont limitées par des instabilités assez faibles, qui sont d'ailleurs très mal identifiées à l'heure actuelle. Il est possible que de nouveaux moyens de stabilisation doivent être inventés et mis en œuvre pour maîtriser ces instabilités résiduelles. Il est possible aussi qu'elles se révèlent finalement tolérables dans des appareils de plus grande taille.

LA FUSION THERMONUCLÉAIRE CONTROLÉE

L'énergie nucléaire peut être libérée soit par la «fission» de noyaux lourds contenant beaucoup de «nucléons» (protons ou neutrons), soit, au contraire, par la «fusion» de noyaux très légers◆. Dans les deux cas, l'énergie libérée provient des forces qui s'exercent entre les nucléons qui constituent les noyaux. Ces forces sont de 2 sortes:
— les forces nucléaires proprement dites (généralement attractives) ne s'exerçant qu'entre 2 nucléons au contact immédiat;
— la répulsion électrostatique entre les protons, causée par leur charge électrique. Contrairement aux forces nucléaires, cette répulsion s'exerce même lorsque les protons sont relativement éloignés l'un de l'autre; elle diminue la cohésion que les forces nucléaires attractives donnent aux nucléons dans un noyau.

◆ Voir l'article : l'Atome, pages 76 à 79.

L'énergie nucléaire est libérée par fission de noyaux lourds...

La libération d'énergie par fission utilise des noyaux dont la cohésion due aux forces nucléaires est presque détruite par la répulsion électrostatique. Cela est possible dans des noyaux contenant beaucoup de nucléons, empilés comme des billes dans un sac, parce que les forces nucléaires attractives ne s'exercent qu'entre nucléons au contact, tandis que la répulsion électrostatique a lieu entre tous les protons. Ces noyaux sont à la limite de la stabilité, et on peut les faire exploser en y faisant pénétrer un neutron supplémentaire.

L'énergie nucléaire libérée lors d'une telle «fission» se retrouve dans l'énergie cinétique des fragments. Notons que le neutron qui sert d'amorce pour déclencher une fission, n'ayant pas de charge électrique, n'a aucune peine à pénétrer dans le noyau. La libération industrielle d'énergie nucléaire par fission est possible parce que nous disposons sur la Terre de noyaux lourds en grandes quantités, par exemple l'uranium 235, qui ont la propriété remarquable suivante: quand ils subissent une fission, ils émettent en moyenne plus d'un neutron, c'est-à-dire qu'ils restituent le neutron qui a servi d'amorce à la fission, et un excédent. Dans une pile où de tels noyaux sont concentrés, leur fission peut être organisée sur une grande échelle, chaque fission libérant des neutrons nécessaires pour en déclencher au moins un autre, etc.

...ou par fusion de noyaux légers

L'énergie de fusion nucléaire se trouve également libérée quand on fait interagir entre eux des noyaux très légers, contenant très peu de nucléons. Quand les deux noyaux viennent en contact immédiat, le nombre de couples de nucléons qui se retrouvent en contact immédiat se trouve considérablement augmenté par rapport à ce qu'il était quand les noyaux étaient indépendants. Ces nouveaux contacts correspondent à de nouvelles interactions par forces nucléaires, dont l'action soudaine donne une certaine quantité d'énergie à l'ensemble des nucléons des deux noyaux. Cette énergie est l'énergie de fusion. L'ensemble des nucléons se réorganise finalement en constituant un noyau plus lourd que les noyaux réagissants, l'énergie de fusion étant libérée par l'émission d'une ou plusieurs particules légères, par exemple un proton, un neutron, un électron et un neutron, etc.
L'énergie rayonnée par le Soleil est fournie au départ par un cycle de réactions de fusion, transformant des protons en hélium 4 (2 protons et 2 neutrons). La première réaction de ce cycle consiste en la fusion de 2 protons en un noyau de deutérium (un neutron + un proton) avec émission d'un électron positif et d'un neutrino. Puis les noyaux de deutérium se fondent ensemble pour former finalement des noyaux d'hélium 4. Ces réactions ont lieu au centre du Soleil dans un plasma dont la température est de l'ordre de 15 millions de degrés, sous une pression de l'ordre du milliard de kg/cm^2, où la proportion de protons est d'environ 90 % pour 9 % d'ions hélium. Ce plasma est confiné par les forces de gravitation.

Les réactions de fusion ne sont possibles que si l'énergie relative des noyaux réagissants est suffisante

Les réactions de fusion entre noyaux légers sont difficiles: cela tient au fait que les 2 noyaux réagissants doivent être en contact immédiat pour que les forces nucléaires puissent opérer. Tant que ce contact n'est pas réalisé, ces forces sont nulles. Seule la répulsion électrostatique entre les noyaux existe alors. Les réactions de fusion ne sont possibles que si les noyaux réagissants se dirigent l'un vers l'autre

avec une énergie suffisante pour vaincre cette répulsion électrique. Chaque réaction de fusion est donc caractérisée par une énergie seuil, qui est l'énergie minimale nécessaire aux noyaux réagissants (dans leur mouvement l'un vers l'autre) pour que la réaction soit possible. Cette énergie seuil se compte en dizaines de k*e*V◆. Cette énergie n'est pas considérable et en fait l'obtention d'un petit nombre de réactions de fusion ne pose pas de problème grave: il suffit de disposer d'un très modeste accélérateur de particules. Malheureusement, il n'en est pas de même quand il s'agit de libérer de l'énergie industriellement.

◆ 1 k*e*V = 1 kiloélectron-volt = 1 000 électrons-volts.

La réaction la plus intéressante pour une libération industrielle d'énergie de fusion est celle pour lesquelles ce seuil d'énergie est le plus bas. Elle consiste en la fusion d'un noyau de deutérium (1 neutron et 1 proton) avec un noyau de tritium (2 neutrons et 1 proton) pour former un noyau d'hélium 4 (2 neutrons et 2 protons) et 1 neutron:

deutérium + tritium ⟶ hélium 4 + neutron + 17,5 M*e*V◆.

◆ Voir le tableau des symboles et unités, page 14.

Cette réaction nécessite que l'énergie relative des noyaux réagissants soit environ 10 k*e*V. L'énergie produite par réaction est 17,5 M*e*V et apparaît sous forme de l'énergie cinétique du neutron et du noyau d'hélium 4 produits.

Nous disposons sur la Terre en quantités illimitées de noyaux de deutérium pour mettre en œuvre industriellement cette réaction. Par contre, le tritium n'existe pas à l'état naturel. Il pourrait cependant être fabriqué en faisant interagir les neutrons fournis par une pile à fission sur du lithium, utilisant la réaction:

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{6}_{3}\mathrm{Li} \longrightarrow {}^{3}_{1}\mathrm{T} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \blacklozenge. $$

◆ Les chiffres supérieurs correspondent au nombre de masse A, les chiffres inférieurs au numéro atomique Z (voir l'Atome, pages 45 et 46).

Cette réaction peut aussi permettre de reformer le tritium consommé dans un réacteur à fusion qui fournit un neutron par réaction.

Les réactions de fusion nucléaire ont été découvertes et étudiées en bombardant une cible avec des noyaux accélérés. Par exemple, la réaction de fusion deutérium-tritium peut être mise en évidence en projetant sur une cible d'eau lourde des ions tritium accélérés à une énergie de 10 k*e*V. Au premier abord, on peut penser que ce dispositif est capable de produire de l'énergie de façon économique. Il n'en est malheureusement rien, car les noyaux accélérés entrant dans la cible ont bien plus de chances (de l'ordre de 10^6 contre une) de dissiper leur énergie cinétique en élevant la température des électrons et des noyaux de cette cible que de créer des réactions de fusion. Comme leur énergie cinétique initiale est de l'énergie noble◆, sa conversion en chaleur équivaut en pratique à une perte pure et simple. Cette perte est loin d'être compensée par l'énergie libérée lors des rares réactions de fusion qui prennent place.

◆ Énergie noble en ce sens qu'elle est créée par un générateur électrique.

La difficulté rencontrée dans le dispositif précédent n'existerait pas si les noyaux et les électrons de la cible, au lieu d'être froids, avaient

une énergie d'agitation thermique égale à l'énergie des noyaux incidents. Dans ce cas, en effet, les collisions subies par ces noyaux ne leur feraient pas perdre en moyenne leur énergie. Une analyse détaillée montre que cette disposition — où le milieu réagissant est un milieu thermique à une température T — est la seule qui permette une mise en œuvre économique de l'énergie de fusion. Les réactions nucléaires sont alors possibles du fait de l'énergie d'agitation thermique des noyaux qui correspond à cette température. La température T doit en conséquence avoir une valeur «thermonucléaire», qui pour les réactions de fusion deutérium-tritium est environ 100 000 000 °K.

Pour que ce milieu régissant libère réellement de l'énergie, pour qu'il se comporte comme un petit Soleil, il faut que le feu nucléaire entretienne sa température thermonucléaire, sans qu'il soit nécessaire de lui fournir de l'énergie de l'extérieur. Le milieu réagissant doit donc recevoir plus d'énergie des réactions de fusion nucléaire qu'il n'en perd par les fuites de chaleur qu'il subit. Comme l'énergie libérée par une réaction de fusion (de l'ordre du M*e*V) ne dépasse pas de beaucoup l'énergie d'agitation thermique d'une particule (de l'ordre de la dizaine de k*e*V), il faut que chaque particule ait une chance de subir une réaction avant de perdre son énergie thermique ou, en d'autres termes, les réactions nucléaires doivent avoir le temps de se produire substantiellement avant que le milieu réagissant ait perdu sa chaleur.

Cela est réalisé dans les bombes H où le milieu réagissant met, pour perdre sa chaleur, le temps qu'il met pour se disperser, compte tenu de son inertie, sous la pression énorme qui y est présente. Ce temps est très court, de l'ordre de 1 μs◆. Mais le temps nécessaire pour que les réactions nucléaires aient lieu dans les bombes H est lui aussi très court (c'est d'ailleurs la raison pour laquelle la bombe «explose»). Cela tient à la densité très grande du milieu réagissant. Une bombe H libère une énergie considérable◆ qui est évidemment inutilisable comme source industrielle d'énergie: une telle source doit être continue et contrôlable. Pour que le «feu nucléaire» de fusion ait cette caractéristique, les réactions nucléaires dans le milieu réagissant doivent être provoquées à un rythme modéré, de façon que l'extraction et l'utilisation de l'énergie soient possibles au fur et à mesure de sa production. Pour ralentir le rythme des réactions, il suffit de diminuer la densité du milieu réagissant. Bien entendu, le bilan gains-pertes d'énergie de ce milieu doit rester équilibré. Si la puissance apportée par les réactions nucléaires est plus faible, il faut diminuer en conséquence les pertes de chaleur. On est donc amené à chercher comment le plasma que constitue le milieu réagissant, avec sa température d'une centaine de millions de degrés K, peut garder sa chaleur pendant un temps assez long, le temps nécessaire pour que les réactions se produisent en douceur.

◆ 1 μs = 1 millionième de seconde.

◆ Cette énergie correspond environ à l'énergie consommée par une grande ville en un an.

Cette expression («en douceur») laisse une certaine liberté dans le choix d'un régime de fonctionnement. Cependant l'analyse détaillée du problème montre que l'on ne peut pas beaucoup s'écarter, pour un milieu réagissant constitué par un mélange deutérium-tritium à 100 000 000 °K, du régime où les réactions nucléaires mettent 1/10 seconde pour se produire, le milieu réagissant contenant alors environ 10^{14} particules par cm^3. Ces données sont précisément celles du problème de la création de plasmas confinés que nous avons spécifiés précédemment◆.

◆ Voir pages 466 et suivantes.

On n'a pas réussi actuellement à créer des plasmas chauds confinés où le feu nucléaire soit entretenu par l'énergie apportée par les réactions de fusion. Cependant, les progrès réalisés cette dernière décennie — et en particulier la compréhension et la maîtrise partielle des phénomènes d'instabilités — sont extrêmement encourageants. Ils permettent de croire qu'un jour ou l'autre le problème de la fusion nucléaire contrôlée sera résolu.

André Samain.

PLASTIQUES (Plastics) pages 332, 333, 511.

Étymologiquement : substance qui peut se modeler. Les matières plastiques que nous fournit la chimie moderne répondent à cette définition, car elles ont été, au moins une fois, susceptibles de prendre une forme déterminée sous des actions extérieures.

Les matières plastiques sont constituées de macromolécules obtenues par polymérisation ou polycondensation ♦. Dans la première catégorie, on trouvera, par exemple, les polyéthylènes, les polychlorures de vinyle, le téflon. La seconde catégorie comprend la bakélite (résine formol-phénol) qui est l'ancêtre. On y trouve aussi les polyesters (plexiglass), les polyamides (nylon).

♦ Voir, à Macromolécules, le paragraphe sur la condensation.

L'action de la chaleur permet de distinguer :

— Les thermoplastiques, qui sont durs à la température ordinaire et sont moulables ou façonnables à chaud. C'est le cas du plexiglass ainsi que du polyéthylène et du nylon (entre autres).

— Les thermodurcissables sont des substances qui se polymérisent et sont moulables ou façonnables à chaud, par formation progressive des macromolécules. Il en résulte un durcissement qui est irréversible (au contraire, les thermoplastiques peuvent être moulés, refroidis, moulés à nouveau un grand nombre de fois). Dans les thermodurcissables, on trouve la bakélite et certaines « résines » utilisées comme colles : dans ce cas, on ajoute au moment de l'emploi un catalyseur qui accélère le durcissement et produit le collage définitif.

PLUTONIUM (Pu) (Plutonium) pages 69, 71, 74, 96, 138, 142, 263, 491, 492, 501, 522.

Élément artificiel, de nombre atomique Z = 94. C'est un métal très dense (19,3 kg par dm³), qui fond à 640° C. Il a été découvert par Seaborg en 1940 sous la forme de l'isotope 238, qui est un des 14 isotopes correspondant au numéro atomique 94, et dont les masses atomiques varient de 232 à 246.

Tous ces isotopes sont radioactifs, ce qui explique qu'on ne les trouve pas dans la nature.

L'isotope le plus important est le plutonium 239 ♦, car il est produit dans les réacteurs nucléaires à partir de l'uranium 238, non fissile, alors qu'il est lui-même fissile, donc utilisable dans un réacteur. La suite des réactions conduisant au plutonium est la suivante :

♦ Se reporter à l'article : l'Atome, page 75.

$$^{238}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{239}_{92}\mathrm{U} + \underset{\text{énergie rayonnée}}{\gamma}$$

$$\left.\begin{array}{l} {}^{239}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{0}_{-1}e + \underset{\text{neptunium}}{{}^{239}_{93}\mathrm{Np}} \\ {}^{239}_{93}\mathrm{Np} \longrightarrow {}^{0}_{-1}e + \underset{\text{plutonium}}{{}^{239}_{94}\mathrm{Pu}} \end{array}\right\} \text{radioactivité } \beta$$

Le plutonium se désintègre spontanément par radioactivité α (émission de noyaux d'hélium) avec une période de 24 000 ans.

POIDS (Weight) pages 30, 336, 482, 492, 523.

Force qui résulte de l'action, sur un corps, du champ de gravitation de l'astre au voisinage duquel il se trouve, et éventuellement d'autres forces moins intenses, comme la force centrifuge due à la rotation de l'astre.

Si g est l'accélération de la pesanteur, le poids d'un corps est le produit $P = mg$, m étant la masse du corps.
Le langage courant confond facilement poids et masse : cela vient de ce que, en un lieu donné, poids et masse sont proportionnels, et que les instruments de mesure (pesons, balances) comparent des poids.
Une comparaison nous fera comprendre la différence :
Un cosmonaute emporte 1 kg de nourriture. Un peson (ressort gradué) indiquera :
— avant l'envol : 10 newtons ou 1 kilogramme-force ;
— pendant l'accélération : 60 newtons ou 6 kilogrammes-force ;
— pendant la phase de satellisation et la phase de chute vers la Lune : 0 newton ou 0 kilogramme-force ;
— sur la Lune : 1,6 newton ou 0,16 kilogramme-force.
La masse, quantité de matière, caractérise un corps. Son poids caractérise l'action, sur ce corps, des forces de gravitation dues à l'astre au voisinage duquel il se trouve.

POIDS ATOMIQUE : voir Masse atomique

POINT CRITIQUE (Critical point) page 492.

Point définissant les conditions telles que les propriétés d'un liquide et de sa vapeur sont identiques. Si l'on porte du dioxyde de carbone (gaz carbonique) CO_2 à 31° C ♦ sous la pression de 73 atmosphères, rien ne permet de dire qu'il s'agit de gaz ou de liquide. C'est l'état critique.
Chaque fluide est caractérisé par ses « coordonnées critiques ». L'eau, par exemple, est à l'état critique à 374° C sous 218 atmosphères, l'hydrogène à — 240° C sous 12,8 atmosphères.
La température critique est importante pour l'étude de la liquéfaction d'un gaz. Pour que celle-ci soit possible, il faut d'abord amener le gaz à une température inférieure à la température critique : cela ne pose pas de problèmes pour le gaz carbonique, mais beaucoup plus pour l'hydrogène ou pour l'hélium (4,2° K, environ —269° C).

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 14.

POINT DE CURIE (Curie Point) : voir Curie

POINT TRIPLE (Triple point) pages 509, 517, 528, 531.

Conditions parfaitement déterminées de température et de pression dans lesquelles peuvent coexister, en équilibre, les 3 états (solide, liquide et gazeux) d'un corps pur. Au même titre que les températures de fusion et d'ébullition sous la pression atmosphérique, la température du point triple est caractéristique du corps étudié et peut servir de point fixe pour l'étalonnage d'un thermomètre. Ainsi, le point triple de l'eau définit une température de 0,01° C ♦.

♦ On est habitué à voir la glace en présence d'eau liquide, mais il ne faut pas oublier la vapeur d'eau, toujours présente, même à des températures relativement basses.

POLARISATION (Polarization) pages 82, 238 et 239, 258, 268, 277, 305, 315, 328, 330, 357, 395 à 404, 417, 432, 433, 453, 479, 498.

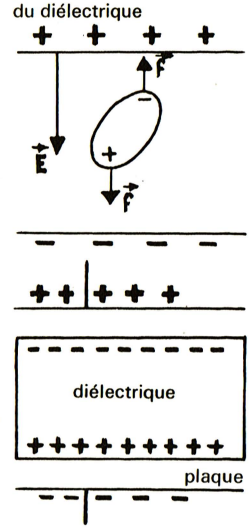
Étymologiquement : acquisition de pôles. C'est ainsi qu'on dira que la chaîne symétrique ♦ « plomb / acide sulfurique / plomb » n'est pas polarisée, alors que la chaîne non symétrique « plomb / acide sulfurique / oxyde de plomb ($Pb\ O_2$) / plomb » est polarisée. Ce qui signifie qu'il existe entre ses extrémités

♦ Voir note page 453.

une force électromotrice. L'exemple que nous avons pris est celui de l'accumulateur au plomb.

La polarisation d'un diélectrique (ou isolant) est un phénomène différent. Lorsqu'on place un diélectrique, comme du verre ou de la paraffine, entre deux plaques maintenues à des tensions différentes, les molécules, portant des charges positives et négatives, tendent à s'orienter dans la direction du champ électrique. Il en résulte que, sur les faces de l'isolant en regard des plaques, vont apparaître des charges, dont l'effet est d'augmenter par influence la charge totale portée par les plaques.

polarisation du diélectrique



Dans le premier dessin, schématisation des forces électriques agissant sur une particule de diélectrique. Dans le second dessin, on voit comment sont disposées les charges à la surface d'un diélectrique polarisé.

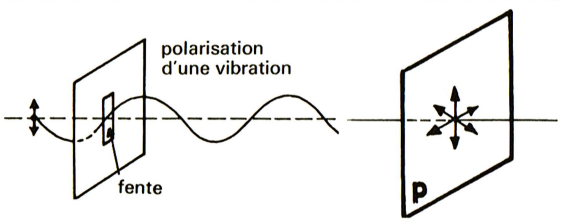
◆ Voir : Aperçu mathématique, page 17.

POLARISATION (d'une vibration) (Polarization of a vibration)

Lorsqu'une vibration transversale se propage dans un plan qui reste fixe, cette vibration est dite polarisée rectilignement. C'est, par exemple, le cas d'une corde vibrante dont les vibrations sont guidées par une fente, comme le montre la figure ci-dessous. Rappelons que la lumière est une vibration transversale et que l'on appelle *vecteur ◆ vibration lumineuse* le vecteur représentant le champ électrique de la théorie de Maxwell.

La lumière naturelle, c'est-à-dire telle qu'elle est émise par une source (lampe à arc, à incandescence), n'est pas polarisée. Cela veut dire que les vibrations peuvent s'effectuer dans une direction quelconque du plan perpendiculaire à la direction de propagation. Et, en moyenne, toutes ces directions sont utilisées. La lumière naturelle a donc une symétrie de révolution.

Lorsqu'elle subit des réflexions ou des réfractions, la lumière perd totalement ou partiellement cette symétrie. Elle se polarise.



les vecteurs vibration lumineuse peuvent prendre toutes les directions du plan P, perpendiculaire au rayon lumineux

Polarisation ◆ par réflexion

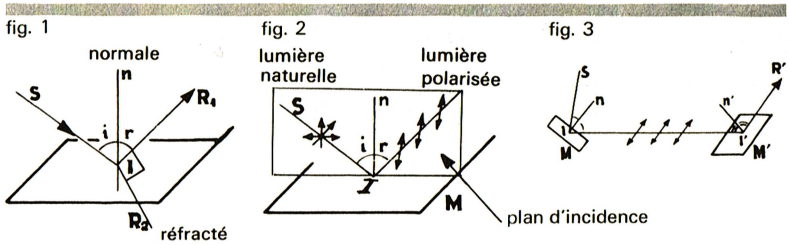
Elle a été observée par Malus ◆ en 1810. Elle se produit lorsqu'un rayon lumineux tombe sur une surface telle que du verre ou de l'eau (il s'agit de surfaces non métalliques, c'est-à-dire non conductrices). La polarisation est totale lorsque l'incidence est telle que le rayon réfléchi R_1 fait un angle de 90° avec le rayon réfracté R_2 (incidence de Brewster) [fig. 1].

Dans ces conditions, seules subsistent les vibrations perpendiculaires au plan contenant le rayon incident et la normale I*n* (plan d'incidence). On a réalisé un « polariseur » (fig. 2).

Si on reçoit sur un miroir analogue M′ une lumière polarisée, on observe, si on fait tourner M′ autour du rayon réfléchi II′, des variations d'intensité lumineuse : celle-ci est maximale lorsque I′R′, rayon émergent, est dans le plan d'incidence sur le premier miroir. Elle est nulle (extinction) lorsque I′R′ est dans un plan perpendiculaire à ce même plan d'incidence. On a réalisé un analyseur (fig. 3).

◆ Voir l'article : l'Optique, page 399.

◆ Étienne Malus (1775-1812) : physicien français qui découvrit la polarisation de la lumière par réflexion et en établit les lois.



Polarisation par réfraction ♦

La biréfringence du spath a été observée par Huygens dès 1690. On obtient, dans ces deux rayons polarisés dans des plans différents : le rayon « ordinaire », qui suit les lois de Descartes, polarisé perpendiculairement au plan d'incidence, et le rayon « extraordinaire », qui ne suit pas les lois de Descartes, polarisé dans le plan d'incidence.

Certains cristaux, outre cette propriété, ont celle d'absorber la vibration ordinaire et de laisser passer la vibration extraordinaire. Ce sont des cristaux dichroïques, tels que la tourmaline, ainsi que certains sels de quinine, qui, déposés sur un support convenable, constituent les polaroïds. On sait que ces polaroïds servent, entre autres, à réaliser des lunettes solaires qui absorbent les reflets, polarisés par réflexion.

♦ Voir l'article : l'Optique, page 399.

POLYMÉRISATION ♦ (Polymerization) pages 121, 332, 333, 478.

♦ Se reporter à l'article : le Cristal, pages 163 à 165.

Production, par réunion d'un certain nombre de molécules de masse molaire faible, d'un corps de masse molaire plus élevée.

C'est ainsi que le « méta », combustible solide improprement appelé alcool solidifié, est un polymère formé par la réunion de 4 molécules d'aldéhyde éthylique $CH_3\ CHO$. Sa formule s'écrira donc $(CH_3\ CHO)_4$.

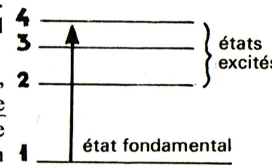
La polymérisation en chaîne conduit à réaliser des macromolécules qui contiennent plusieurs centaines de molécules simples.

POMPAGE OPTIQUE ♦ (Optical pumping) pages 317, 322, 336.

♦ Se référer à Éléments de transition, Laser.

Technique mise au point par Alfred Kastler pour réaliser, dans un cristal, une inversion de population des électrons, nécessaire pour obtenir ensuite une émission stimulée de lumière, autrement dit l'effet laser.

Un exemple simple est celui du pompage employé dans le laser à rubis. Si l'on considère les ions chrome Cr^{+++}, contenus dans ce cristal, ils peuvent être dans leur état fondamental (tous les électrons sont le plus près possible du noyau [niveau 1], à la place prévue par les règles d'occupation des niveaux ou règles de sélection) ou dans des états excités : certains électrons sont sur des orbites plus éloignées du noyau (niveaux 2, 3, 4...). Le cristal comprend donc une population d'ions, répartis sur le niveau fondamental et sur les différents niveaux excités. Dans son état normal, la population est la plus élevée sur le niveau fondamental et décroît au fur et à mesure qu'on va vers les niveaux les plus excités.



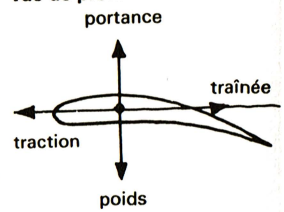
Il s'agit d'inverser la population, c'est-à-dire de vider en grande partie le niveau 1, pour remplir les niveaux excités 2 ou 3. Pour cela, on éclaire, à l'aide d'une lumière convenable (flash), le cristal de rubis. Les photons apportent l'énergie nécessaire pour faire passer un certain nombre d'électrons du niveau fondamental 1 au

niveau excité 4. Mais les électrons des atomes ainsi excités ne restent pas sur le niveau 4 et retombent spontanément sur le niveau 3, dont la population se trouve ainsi augmentée aux dépens du niveau 1. On a réalisé l'effet cherché. Il ne reste plus qu'à provoquer la chute simultanée de tous les électrons des atomes excités du niveau 3 aux niveaux 2 ou 1 suivant les cristaux pour obtenir l'émission laser.

PORTANCE (Lift) pages 24, 138, 520.

Force verticale, due à la résistance de l'air qui s'exerce sur une aile et assure la sustentation d'un avion. Les forces s'exerçant sur une aile, en vol rectiligne horizontal et uniforme, se schématisent ainsi en :
— *portance*, qui équilibre le poids :
— *traînée*, qui équilibre la traction de l'hélice (ou la poussée des réacteurs).
La portance d'une aile de surface S, se déplaçant à la vitesse V dans un air de masse volumique ρ, est donnée par : $F = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_Z$.

aile en coupe, vue de profil



Le coefficient C_Z caractérise une aile donnée, dans des conditions d'incidence (angle du plan de l'aile avec la direction du déplacement) données. Toutes choses étant égales par ailleurs, l'exploration du domaine des vitesses trans- et supersoniques a montré qu'à ces vitesses le coefficient C_Z, qui restait constant dans le domaine des basses vitesses, décroît assez brutalement pour se stabiliser à nouveau dans le domaine supersonique.

PORTEURS DE CHARGE (Charge bearers)

Corpuscules participant au transport des charges électriques. Dans les métaux, les porteurs sont les électrons ; ce sont donc des charges négatives qui sont transportées.
Dans les électrolytes, les porteurs sont des ions soit positifs, soit négatifs et le courant résulte des mouvements en sens inverse des deux types de charge.
Dans les semi-conducteurs, les porteurs de charge sont soit les électrons (type *n* = négatif), soit des « trous positifs », c'est-à-dire un défaut produisant un manque d'électron (type *p*). Ce trou est comblé par un électron qui laisse à sa place... un trou ♦. Tout se passe donc comme si une charge positive se propageait au milieu de la matière.

♦ Voir l'article : l'Électronique, page 237.

POSITRON (Positron) pages 28, 29, 46, 100, 103, 176, 205, 296, 326, 354, 428 et 429, 488.

Électron positif ou anti-électron, de charge : $1{,}6.10^{-19}$ coulomb et de masse : $0{,}9.10^{-27}$ gramme. Prévu par Dirac en 1928, Anderson l'a mis en évidence en 1932 par la trace laissée dans une chambre de Wilson.
Des positrons sont produits dans la radioactivité β^+ ♦. Bien que le positron soit stable, son observation est difficile, car il s'annihile avec production d'un photon gamma, lorsqu'il rencontre un électron négatif.
C'est en somme la réaction inverse de la matérialisation d'un rayon gamma, sous la forme d'un électron négatif et d'un positron.

♦ Voir l'article : l'Atome, page 59.

POTENTIEL ♦ (Potential) pages 124, 187, 198, 234, 235, 237 à 239, 250, 516, 530, 534.

♦ Se reporter à l'article : Électricité et magnétisme, pages 187 et 188.

Certains champs ont la propriété suivante : si un corps, soumis à ce champ, se déplace d'un point A à un point B, le travail effectué au cours de ce déplacement

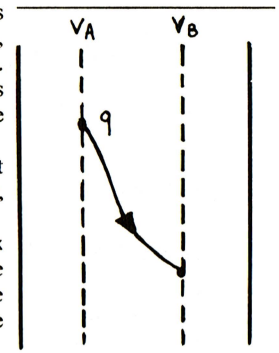
par les forces dues à l'existence du champ ne dépend que des points A et B, et non du chemin suivi au cours de ce déplacement (c'est le cas, entre autres, du champ de gravitation et du champ électrique). On peut alors associer à chaque point une grandeur V telle que le travail effectué pour aller de A à B soit proportionnel à la différence $V_A - V_B$ des valeurs prises par V en A et B. C'est cette grandeur qu'on appelle potentiel.

Potentiel électrique et potentiel de gravitation

Prenons l'exemple du champ électrique. Une charge q se déplaçant dans le sens du champ fournit de l'énergie. Cette énergie W, perdue au cours du déplacement, s'exprime en fonction des potentiels électriques de A et B par $W = q\,(V_A - V_B)$. $V_A - V_B$ est la différence de potentiel entre A et B, appelée aussi tension. Dans le cas que nous avons envisagé, V_A est supérieur à V_B : une charge positive se déplaçant vers les potentiels décroissants fournit de l'énergie.

On pourrait de même définir un potentiel de gravitation : l'énergie que peut fournir le « poids » d'une horloge ancienne dépend de la course qu'il peut effectuer, c'est-à-dire de la différence des altitudes de départ et d'arrivée.

Dans les deux cas, la définition complète de la fonction de potentiel exige le choix arbitraire d'une valeur ; ainsi, on a l'habitude de prendre le potentiel électrique du sol égal à zéro. Cela n'a rien d'obligatoire, d'autant plus que la notion de différence de potentiel, qui est, elle, parfaitement définie, est aussi importante que celle de potentiel.



$W = q\,(V_A - V_B)$
travail de déplacement d'une charge électrique du potentiel V_A au potentiel V_B

Mathématiquement, on définit le potentiel comme une fonction, dont on déduit le champ par dérivation : Si V est fonction des coordonnées x, y, z du point A considéré, le vecteur ♦ champ en ce point a pour composantes les dérivées partielles de V changées de signe, ce qu'on écrit de façon condensée en disant que le champ est le gradient du potentiel (au signe près) : $\vec{E} = -\overrightarrow{grad}\,V$,

ou $\vec{E} \begin{cases} E_x = -\dfrac{\partial V}{\partial x} \\ E_y = -\dfrac{\partial V}{\partial y} \\ E_z = -\dfrac{\partial V}{\partial z} \end{cases}$

♦ Vecteur, dérivée : voir Aperçu mathématique, page 17.

POTENTIEL (barrière de) : voir pages 51, 76, 77, 525.

POTENTIEL (différence de) : voir Potentiel

PRÉCIPITATION (Precipitation)

Apparition, lors du mélange de deux liquides, d'une phase solide, due à l'insolubilité d'un produit de la réaction des deux liquides.

PRESSION (Pressure) pages 172, 173, 181, 184, 215, 265, 271, 316, 332, 336, 441, 444, 452, 466, 468, 474, 476, 479, 505, 516, 524, 526, 530, 531.

Les effets d'une force dépendent de la surface sur laquelle cette force est appliquée : le piéton s'enfonce dans la neige, le skieur s'y enfonce beaucoup moins. C'est pour tenir compte de ces faits qu'on définit la pression p comme le quotient de la force F par la surface S à laquelle elle s'applique : $p = \dfrac{F}{S}$.

L'unité de pression, dans le système légal, est le newton par mètre carré (N/m^2), appelé aussi pascal (Pa) en France. C'est une unité trop petite pour les pressions courantes : on utilise le kgf/cm^2 ♦, qui vaut $9{,}8.10^4$ pascals, ou, ce qui est plus logique, le bar (B), qui vaut 10^5 pascals.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 14.

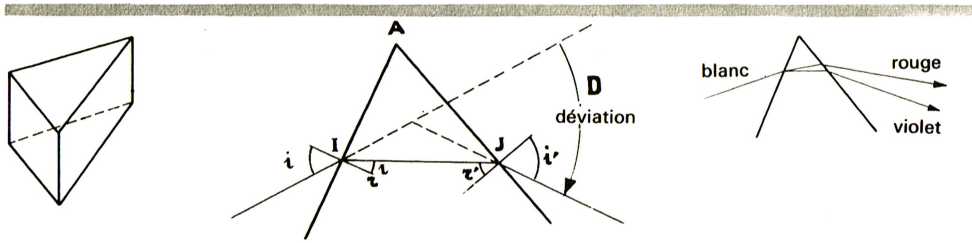
PRINCIPE (Principle) pages 40, 50, 98, 110, 264, 409, 454, 496, 509.

Énoncé, posé a priori, d'une portée trop générale pour qu'il soit possible de le démontrer, mais que toutes ses conséquences conduisent à considérer comme vérifié. C'est ainsi qu'on parlera du principe d'équivalence (premier principe de la thermodynamique) et du principe de Carnot.
Au contraire, l'énoncé connu sous le nom de « principe » d'Archimède, susceptible d'une démonstration rigoureuse, est en réalité un théorème.

PRINCIPE DE CARNOT : voir Carnot (Principe de)

PRISME (Prism) pages 267, 347, 370, 400, 506, 507.

Milieu transparent limité par des faces planes non parallèles. Lorsqu'un pinceau lumineux tombe sur un prisme, il est dévié, conformément aux lois de la réfraction. Mais, si ce pinceau est formé d'une lumière non monochromatique (lumière blanche, par exemple), chaque lumière va suivre dans le prisme un trajet différent. C'est le phénomène de dispersion. En effet, le verre a un indice de réfraction différent pour chaque couleur. La lumière est ainsi décomposée et on observe un spectre coloré. Chaque verre est caractérisé par son pouvoir dispersif, quotient de la variation d'indice $n_1 - n_2$, correspondant à une variation de la longueur d'onde de λ_1 à λ_2 : $K = \dfrac{n_1 - n_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$.



PROPAGATION : pages 37, 85, 98, 173, 183, 194, 196, 223, 224, 264, 277, 305, 312, 330, 331, 338, 349, 358, 408, 410, 417, 446, 465, 480, 482, 489, 505, 518, 533.

PROTON (Proton) pages 23, 32 à 79, 81, 88, 125, 170, 172, 208, 250, 256, 259, 260, 263, 273, 276, 284, 294, 296, 305, 306, 313, 337, 340, 349, 350, 351, 352, 354, 355, 356, 413, 414 à 443, 457, 473, 488, 490, 511, 530.

Particule élémentaire constituée par le noyau de l'atome d'hydrogène. Sa masse est 1 836 fois celle de l'électron et sa charge positive est égale à celle (négative) de l'électron, soit $1{,}6.10^{-19}$ coulomb. Le proton est un fermion $\left(\text{son spin est } \frac{1}{2}\right)$.
C'est une particule stable, comme l'antiproton qui est son anti-particule. L'intérêt du proton est sa facilité de production, ce qui en fait un projectile de choix dans les accélérateurs. Les rayons cosmiques sont constitués principalement de protons animés de grandes vitesses.

QR

QUANTIFICATION (Quantification) pages 83, 103. 143, 220 à 222, 225, 260, 299, 339, 346, 353, 354, 418, 452, 455, 501, 505, 507, 508, 509, 539.

Lorsqu'on gravit un plan incliné, on peut s'élever en altitude de façon tout à fait continue. Au contraire, lorsqu'on utilise un escalier, l'altitude ne peut varier que d'au moins la hauteur d'une marche, ou d'un multiple entier de celle-ci. Nous avons quantifié l'altitude....

Plus généralement, une grandeur est quantifiée lorsqu'elle ne peut varier que de façon discontinue. C'est le cas de l'énergie d'un électron lié à un atome, et aussi de son moment cinétique, dont la grandeur et la direction ne peuvent varier que de manière discontinue.

QUANTIQUE (Mécanique) : voir Mécanique et les pages 34, 39, 85, 103, 173, 202, 334, 359, 363, 412, 418, 444, 454, 504, 509.

QUANTIQUES (Nombres) : voir Nombres

QUANTUM (Quantum) pages 37, 83, 97, 177, 182, 218, 261, 288 à 292, 321, 326, 354, 449, 455, 505.

Dans l'exemple donné à « quantification » nous avons défini un quantum d'altitude : c'est la hauteur d'une marche de l'escalier. Le quantum est donc la quantité indivisible caractérisant une grandeur.

Toutes les grandeurs physiques quantifiées font intervenir la constante de Planck h, qu'on appelle « quantum d'action ♦ ». C'est ainsi que le quantum d'énergie rayonnante de fréquence ν, autrement dit le photon, correspond à une énergie $W = h\nu$.

♦ « Quantum d'action » ou quantum élémentaire, doit être pris comme une définition. Cette expression trouve son origine dans l'apparition d'énergie comme résultat d'une « action » — dans un sens assez général — sur un système physique.

QUANTITÉ DE MOUVEMENT (Momentum impulse)

Grandeur utilisée en mécanique, définie en mécanique classique comme le produit de la masse d'un corps par sa vitesse : $p = mv$. En mécanique relativiste, elle prend la forme :

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$ où c est la vitesse de la lumière.

QUARK pages 298, 413.

Le nombre des particules élémentaires devient trop élevé pour qu'on ne puisse émettre des doutes sur leur élémentarité... Selon une hypothèse de Gell-Mann, toutes les particules, exception faite de l'électron et du neutrino, seraient constituées

par l'assemblage de trois quarks, particules portant des charges égales à $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$, ou $\frac{1}{2}$ de celle de l'électron. La découverte de mésons tels que l'oméga négatif (Ω^-), dont les propriétés pourraient se déduire d'un assemblage de quarks, ont apporté un début de vérification de la théorie de Gell-Mann. Plus récemment, il semble que l'équipe australienne de McCuster ait identifié une particule de charge $\frac{2}{3}$, ce qui confirmerait l'existence des quarks.
Mais les preuves expérimentales sont encore bien minces...

QUARTZ (Quartz) pages 328, 452, 507, 527.

Silice cristallisé qui possède des propriétés piézoélectriques : si une lame de quartz est placée entre deux plaques métalliques, une pression exercée sur la lame se traduira par une différence de potentiel entre les deux plaques.
Réciproquement, une différence de potentiel appliquée entre les faces extrêmes se traduira par une compression de la lame de cristal (P. et J. Curie, 1880).
Les applications de ce domaine sont nombreuses et variées ; un quartz est capable de transformer des oscillations électriques en oscillations mécaniques, et réciproquement. On pourra ainsi utiliser des microphones ou des têtes de lecture piézoélectriques et, inversement, utiliser des haut-parleurs à quartz. Cette technique est valable même dans le domaine des ultrasons (sondes ultrasonores). Le quartz est utilisé dans la réalisation de détecteurs de vibration ou d'efforts mécaniques reliés à des oscillographes (véhicules d'essais de la S.N.C.F.).

Un quartz intercalé dans le circuit oscillant d'un émetteur entre en vibration avec un maximum d'amplitude lorsque la fréquence qu'on lui applique est égale à sa fréquence propre, c'est-à-dire la fréquence des vibrations longitudinales que la lame prendrait spontanément. Il y a résonance. Dans ces conditions, le quartz réagit sur le circuit oscillant auquel il impose sa fréquence. On réalise un oscillateur dont la fréquence est très stable, puisqu'elle varie avec la température de fonctionnement de 1/10 000 de sa valeur, par degré.

QUASI-PARTICULES (Quasi-particles)

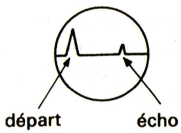
On est amené, pour décrire certains phénomènes résultant de l'excitation d'un système formé d'un grand nombre de particules, à envisager, pour la commodité du calcul, des quasi-particules, définies de la façon suivante : on substitue au système comprenant un grand nombre de particules en interaction un système de quasi-particules sans interactions entre elles, c'est-à-dire se comportant comme un gaz parfait.
C'est ainsi que les phonons sont des quasi-particules rendant compte des oscillations dues à l'agitation thermique dans un cristal. Il existe d'autres quasi-particules : plasmons et excitons (ensemble électron-lacune positive dans un isolant).

RADAR ♦ pages 28, 91, 208, 220, 223, 224, 229, 233, 234, 245, 246 et 247, 344, 462, 527.

♦ Se reporter à l'article : l'Électronique, pages 246 et 247.

Système de repérage mis au point durant la Seconde Guerre mondiale.
Une antenne permet d'envoyer, dans une direction aussi précise que possible, un signal électromagnétique très bref (1/1 000 s).

Si l'onde émise rencontre un objet (avion, bateau ou relief montagneux), elle est réfléchie par cet objet et revient vers l'émetteur. Un oscillographe permet de visualiser le départ du signal et le retour de l'écho.
La distance entre les top de départ et de retour donne le temps qu'a mis l'onde pour effectuer l'aller et retour à la vitesse de 300 000 km/s ♦. On connaît donc la distance de l'objet à l'émetteur. Un dispositif de balayage plus complexe, couplé à la rotation de l'antenne, permet de déterminer non seulement la distance de l'objet, mais aussi la direction dans laquelle il se trouve.
Cette invention (basée sur un brevet de 1912) est une de celles qui a le plus servi la sécurité maritime et aérienne. De plus, couplé avec des appareils de pointage, le radar peut assurer une précision de tir qui en fait un redoutable engin de guerre.



♦ Vitesse de propagation de la lumière et de toutes les ondes électromagnétiques (dans le vide et, sensiblement, dans l'air).

RADIATIONS (Radiations) pages 137, 143, 176, 253, 310, 312, 347, 358, 363, 408, 449, 454, 487, 495, 499, 501, 506, 528.

Mot employé dans un sens voisin et aussi peu précis que celui de rayons. Il désigne aussi bien une onde électromagnétique, lumière, infrarouge ou ultraviolet, et même onde hertzienne, qu'une émission corpusculaire comme les radiations alpha ou bêta de la radioactivité.

RADIOACTIF (élément) : voir Élément radioactif et les pages 84, 284, 314, 478, 491, 498, 519, 520.

RADIOACTIF (équilibre) : voir Équilibre

RADIOACTIVITÉ ♦ (Radioactivity) pages 32, 48, 53, 57 à 64, 69, 82, 86, 167, 171, 172, 250, 254, 257, 259, 269, 270, 272, 275, 313, 314, 324, 350, 428, 433, 482, 487, 499, 503, 522, 525, 529.

♦ Se reporter à l'article : l'Atome, pages 57 à 64.

Découverte par Becquerel en 1896 et étudiée par Pierre et Marie Curie en 1897-1898, la radioactivité consiste en une transformation spontanée du noyau, avec émission de corpuscules et formation d'un noyau nouveau.
La radioactivité naturelle, c'est-à-dire celle des substances existant dans la nature, se présente sous trois formes.

Radioactivité alpha (α)

Émission d'un noyau d'hélium, donc chargé positivement. Ce « rayonnement » est peu pénétrant, mais provoque une forte ionisation.

$$^{228}_{88}\mathrm{Ra} \longrightarrow {}^{224}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

radium — radon — hélium (particule α).

Radioactivité bêta moins (β^-)

Émission par le noyau d'un négaton à grande vitesse (jusqu'à 270 000 km/s), assez pénétrant, mais peu ionisant. Exemple :

$$^{218}_{84}\mathrm{Po} \longrightarrow {}^{218}_{85}\mathrm{A}^{+} + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\nu$$

polonium — astate — (β —) neutrino.

Radioactivité gamma (γ)

Accompagnant les précédentes, c'est l'émission d'un photon extrêmement énergétique, comparable à un rayonnement X de très faible longueur d'onde (0,1 à 0,001 angström). C'est un rayonnement très pénétrant, qui marque le retour du noyau excité à son état stable.
Certains corps, soumis à un flux de neutrons ou de particules α (découverte de Frédéric et Irène Joliot-Curie), deviennent radioactifs, alors qu'ils ne le sont pas

naturellement. Ils présentent des phénomènes analogues à la radioactivité naturelle, mais, dans certains cas, on observe des types anormaux de radioactivité :
— la radioactivité β^+ ; c'est l'émission d'un positron par le noyau, suivant une réaction du type :

$$^{30}_{15}P \longrightarrow {}^{30}_{14}Si + {}^{0}_{+1}e + {}^{0}_{0}\nu$$

radiophosphore silicium positron neutrino

— La fission spontanée de certains éléments transuraniens, comme le californium.
On peut expliquer la radioactivité β^+ ou β^- par des transformations de protons en neutrons, considérés comme deux formes de nucléons. Chaque élément radioactif est caractérisé par sa période radioactive, au bout de laquelle le nombre de noyaux s'est réduit de moitié. Cette période peut varier entre le milliard d'années ($^{238}_{92}U$ ♦) et la milliseconde ($^{214}_{84}Po$: $1{,}5.10^{-4}$s).

♦ Le chiffre supérieur correspond au nombre de masse de l'atome ; le chiffre inférieur correspond à la charge du noyau.

Séries radioactives

En général, un noyaû radioactif, au cours de sa désintégration, donne un noyau également radioactif, qui va se désintégrer à son tour, et ainsi de suite jusqu'à un élément stable. Il existe des séries radioactives — ou familles radioactives — partant d'un élément à longue période et aboutissant, de désintégration en désintégration, à un élément stable. On connaît ainsi quatre familles :

	Élément de plus grande période	Période	Élément stable
Thorium	^{232}Th	$1{,}4.10^{10}$ ans	^{208}Pb
Uranium-radium	^{238}U	$4{,}5.10^{9}$ ans	^{206}Pb
Actinium	^{235}U	$8{,}5.10^{8}$ ans	^{207}Pb
Neptunium	^{237}Np	$2{,}2.10^{6}$ ans	^{209}Bi

Pb = plomb
Bi = bismuth.

Ceci explique la complexité du rayonnement d'un échantillon radioactif naturel : cet échantillon contient en effet tous les membres de la famille, en équilibre, c'est-à-dire en nombre tel que, à chaque instant, il se forme autant de noyaux de chaque sorte qu'il en disparaît.

RADIO-ISOTOPE : voir Isotope et la page 117.

RADIUM : pages 57, 61 à 63, 166, 167, 254, 257, 314, 427, 499, 503.

RAFFINAGE (Refining)

Suite d'opérations conduisant à l'obtention d'un produit pur, ou du moins adapté à l'usage qu'on veut en faire. C'est ainsi qu'on peut appeler « raffinage » la distillation du pétrole brut qui conduit aux essences et fuels divers, comme la suite d'opérations menant du minerai d'uranium à l'uranium enrichi, comprenant plus de 90 % d'uranium 235.

RAIE SPECTRALE (Spectral line) pages 39, 177, 227, 290, 334, 339, 505, 507, 538.

Rayonnement d'énergie bien définie, donc sensiblement monochromatique, apparaissant dans un spectroscope comme une raie de faible largeur ♦.

♦ Voir Spectre.

RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE ♦ (Electromagnetic radiation) pages 39, 46, 139, 263, 270, 466, 490.

♦ Se reporter à l'article : Électricité et magnétisme, pages 190 à 195.

Comme son nom l'indique, l'électromagnétisme étudie les relations entre phénomènes électriques et magnétiques. Voici un phénomène électrique courant : quand nous nous peignons avec un peigne en ébonite, les cheveux sont attirés. Le peigne, au contact des cheveux, s'est chargé d'électricité (charge négative), tandis que les cheveux ont acquis une charge opposée (positive) ; il y a donc attraction. On peut dire également qu'une charge électrique crée autour d'elle un champ électrique ; une autre charge placée dans ce champ est alors soumise à une force. Voici un phénomène magnétique aussi courant : l'aiguille d'une boussole placée près d'un aimant va s'orienter vers ce dernier. L'aiguille est elle-même un petit aimant comportant un pôle nord et un pôle sud ; les pôles de même nom des deux aimants vont se repousser. On peut dire également que l'aimant (ou toute charge magnétique) crée autour de lui un champ magnétique ; un autre aimant (ou une autre charge) placé dans ce champ est alors soumis à une force.

Quelles relations peut-il y avoir entre champs électrique et magnétique? L'expérience de Faraday (1831) nous en donne une idée : on enroule un fil sur une bobine et on relie ses deux extrémités. On place un aimant au centre de cette bobine et on le retire rapidement : un courant se produit alors dans le fil. La variation du champ magnétique, créée par le déplacement de l'aimant, a induit dans le fil conducteur un champ électrique qui a, lui-même, créé un courant. D'autres expériences montreraient qu'une variation du champ électrique induit un champ magnétique.

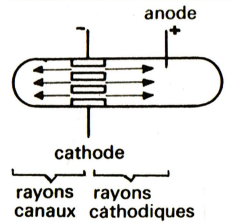
Nous voici bien près du rayonnement électromagnétique. Considérons un fil parcouru par un courant continu. Voyons ce qui se passe dans un plan P, perpendiculaire au fil. Dans ce plan, à la distance r du fil, le courant i crée un champ magnétique H constant sur un cercle de rayon r ayant le fil pour centre, la direction du champ H étant tangente à ce cercle. Ce cercle est appelé ligne de force du champ. Si l'on inverse le sens du courant i, le champ H change de signe, la ligne de force restant la même. La variation du champ magnétique (de —H à +H) induit, d'après l'expérience de Faraday, un champ électrique E, variable lui aussi et perpendiculaire au champ magnétique H. Le champ alternatif E induit, à son tour, un champ alternatif H et le phénomène se propage de proche en proche, dans toutes les directions de l'espace à partir du fil.

Si nous nous plaçons, par l'imagination, à une très grande distance du fil (de l'ordre de grandeur des distances des étoiles à la Terre), toutes les directions de propagation seront parallèles et l'on sera en présence d'une onde électromagnétique plane. Cette onde résulte de la propagation de deux champs : le champ électrique E et le champ magnétique H, en phase, perpendiculaires entre eux et situés dans le plan d'onde perpendiculaire à la direction de propagation.

♦ Voir Radioactivité et l'article : l'Atome, pages 57 à 64.

♦ Voir Cathodique et l'article : Électricité et magnétisme, pages 195 et 196.

RAYONS (Rays) pages 98, 114, 204, 351, 487.



Émissions corpusculaires ou électromagnétiques qui peuvent être d'origines très diverses :

— Rayons alpha, bêta —, bêta + et gamma ♦ ;

— Rayons cathodiques : faisceau d'électrons émis par une cathode émissive ♦ ;

— Rayons canaux ou positifs : faisceaux d'ions positifs découverts par Goldstein dans des tubes à rayons cathodiques. Ainsi appelés parce qu'ils semblaient sortir des canaux percés dans la cathode du tube. Ce sont des ions provenant de

l'ionisation du gaz résiduel de l'ampoule et accélérés en sens inverse des électrons par le champ régnant dans celle-ci.

RAYONS CATHODIQUES : voir Cathodiques (rayons)

et les pages 166, 195, 273, 277, 447, 489, 498, 518.

RAYONS COSMIQUES (Cosmic rays)

pages 27, 29, 88, 317, 320, 325, 338, 340, 349, 359, 442, 443, 484, 537, 538.

Comme leur nom l'indique, ces rayons sont d'origine extra-terrestre. Ils sont constitués par des protons de haute énergie : 1 000 GeV ♦, et souvent beaucoup plus (les plus puissants accélérateurs de protons fournissent des énergies de l'ordre de 30 GeV). Ils comprennent aussi des noyaux plus lourds. C'est le rayonnement primaire.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

Dans l'environnement terrestre, les protons rencontrent les atomes de l'atmosphère et il se produit des interactions, dont il résulte des mésons π, des muons et des photons de grande énergie, ainsi que des électrons, protons et neutrons provenant de la désintégration du noyau cible.

Pendant longtemps, les rayons cosmiques ont été la seule source de particules de haute énergie, et Louis Leprince-Ringuet a exploité systématiquement cette source grâce à des observatoires en altitude et des ballons-sondes. Les grands accélérateurs rendent maintenant des services analogues.

RAYONS X ♦ (X-Rays)

pages 34, 57, 58, 86, 115, 151, 167, 174, 195, 208, 312, 318, 320, 342, 347, 358, 363, 418, 433, 434, 449, 487, 496, 498, 507, 517, 539.

♦ Se reporter à l'article : le Cristal. pages 151 à 155.

Découverts en 1895 par Röntgen, les rayons X (appelés ainsi car leurs propriétés ont longtemps paru mystérieuses) sont produits chaque fois qu'un faisceau d'électrons de vitesse suffisante rencontre un obstacle matériel.

C'est un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde, de l'ordre de l'angström (1 Å = 10^{-10} m), sensiblement entre 0,1 et 5 Å.

Les propriétés des rayons X avaient de quoi surprendre : comme les « rayons cathodiques », ils excitent la fluorescence des corps comme le platinocyanure de baryum, le sulfure de zinc, etc. Ils impressionnent également la plaque photographique. Ils sont fortement ionisants. Mais, à la différence des rayons cathodiques, ils ne sont pas déviés par les champs électriques ou magnétiques. Et, surtout, ils se manifestent à l'extérieur du tube, et se révèlent extrêmement pénétrants. Ce sera d'ailleurs une des applications les plus importantes ; en effet, cette pénétration apparaît comme dépendant de deux facteurs :

— *La tension accélératrice des électrons :* plus elle est élevée, plus les rayons X seront pénétrants (ou « durs »). Dans le cas contraire, ce sont des rayons « mous ».

— *La nature du corps irradié :* l'absorption est d'autant plus élevée qu'il s'agit de corps de numéro atomique (donc de masse atomique) élevé.

La nature des rayons X a été mise en évidence en 1912 par von Laue qui montra que les rayons X se diffractaient sur les cristaux, dont la structure régulière jouait le rôle de réseau. Ainsi était prouvée leur nature électromagnétique.

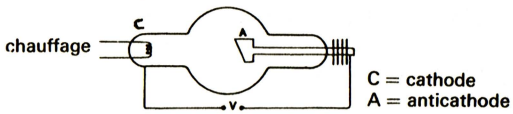
Production des rayons X

Elle s'effectue dans un tube de Coolidge : une cathode émissive C, chauffée par un filament, envoie ses électrons, accélérés par la tension V, sur une « anticathode ♦ » A sur laquelle se produit l'émission X.

♦ L'anticathode joue sensiblement le rôle de l'anode.

Par réglage du chauffage de C, on règle l'intensité du faisceau. Par réglage de la tension V, on règle la dureté des rayons émis : en effet, un électron lancé sous une

tube de Coolidge



tension V peut émettre un photon dont la longueur d'onde minimale λ est énoncée par $\lambda = \frac{hc}{eV}$, où h = constante de Planck, c = vitesse de la lumière, e = charge de l'électron, V = tension accélératrice.

Applications des rayons X

Elles sont variées. Tout le monde connaît les radiographies, qui mettent à profit la différence d'absorption par les os (à base de calcium Ca = 40) et par la peau (à base de carbone C = 12). Notons au passage que l'irradiation abusive par des rayons X comme par toute radiation ionisante peut provoquer des désordres allant de l'anémie à des formes beaucoup plus graves : beaucoup de radiologues, avant qu'on ait conscience de ce danger, ont payé de leur vie une exposition trop prolongée aux rayons X.

La cristallographie utilise, sous des formes diverses, les diagrammes de diffraction de von Laue pour l'étude de la structure des cristaux. D'autre part les spectres de rayons X donnent accès à la structure électronique de l'atome.

N'oublions pas, enfin, les applications industrielles (recherche de défauts) où les rayons X sont concurrencés par les rayons gamma, et la répression des fraudes : on distingue un diamant vrai, transparent aux rayons X, d'un faux, en cristal de plomb, opaque aux rayons X.

RÉACTEUR (Reactor) pages 97, 181, 263, 269, 305, 312, 337, 428, 519, 526.

Appareil de génie chimique ♦ dans lequel s'effectue une réaction chimique. En technique aéronautique ou spatiale, un réacteur est un appareil de propulsion faisant appel à la réaction produite par l'expulsion, en sens inverse du mouvement, d'un jet gazeux à grande vitesse.

♦ Technique de construction d'appareils de chimie industrielle.

RÉACTEUR NUCLÉAIRE ♦ (Nuclear reactor) pages 62 à 64, 69, 71 à 75, 92, 137, 172, 253, 259, 263, 269, 312, 314, 317, 344, 413, 424, 454, 478, 522, 529.

♦ Se reporter à l'article : l'Atome, pages 71 à 75.

Encore appelé pile atomique. Dispositif permettant d'utiliser l'énergie nucléaire à la production d'électricité, ou à d'autres applications, telles que production d'éléments comme le plutonium (piles plutonigènes) ou l'irradiation de corps stables pour réaliser les isotopes radioactifs.

Constituants d'un réacteur

Un réacteur comprend, à l'intérieur d'un blindage d'acier et de béton destiné à absorber le rayonnement gamma et les neutrons, un volume dans lequel se trouve le réacteur lui-même. C'est-à-dire :

— *Des barres de combustible*, matière fissile, plus ou moins concentrée, telle que l'uranium 235 ou le plutonium, groupées en un assemblage interchangeable et gainées de métal (cette précaution a pour but d'éviter au fluide utilisé dans les échanges thermiques de transporter les produits radioactifs de la fission).

— *Un modérateur*, substance capable de freiner les neutrons émis pour qu'ils soient

à des vitesses suffisamment faibles pour produire une nouvelle fission. Ce modérateur peut être du graphite (G-2 et G-3 de Marcoule), de l'eau lourde (EL-3 de Saclay, EL-4 de Brennilis) ou de l'eau naturelle (réacteurs marins, piles « piscines » de Fontenay, Grenoble, etc.).

— *Un fluide caloporteur* est chargé d'évacuer vers l'extérieur la chaleur produite dans le cœur du réacteur. Ce peut être le modérateur lui-même si celui-ci est de l'eau naturelle ou lourde, ou un gaz sous pression (CO_2 dans EL-4, G-2, G-3, E.D.F.-1, 2, 3). On a utilisé aussi du sodium liquide (« Phénix » à Marcoule, « Rapsodie » à Cadarache).

Lorsque le réacteur est destiné en tout ou en partie à la production de plutonium, on trouvera autour du cœur lui-même des assemblages de barres d'uranium 238 destinées à être transformées en plutonium sous l'action du flux de neutrons.

— *Un ensemble de barres* de contrôle, absorbant les neutrons, pouvant se déplacer, et réglant par leur jeu le flux des neutrons au niveau critique : une fission produisant 2,5 neutrons en moyenne, il faut en absorber 1,5 pour que la réaction ne s'emballe pas, transformant le réacteur en bombe...

A quelques variantes près, on trouvera tous ces éléments dans les réacteurs utilisés. Toutefois, dans les piles dites à neutrons rapides, le modérateur est absent. Ces piles fonctionnant avec un combustible très enrichi, on peut admettre une perte de neutrons plus importante. En fait, il y a perte pour la fission seulement. Les neutrons sont absorbés par la « couverture » d'uranium 238 qui se transforme en plutonium.

Les réacteurs nucléaires produisent de l'électricité avec régularité depuis plusieurs années, et quelle que soit la filière adoptée. Mais le prix du kWh ◆ nucléaire n'est pas encore compétitif avec celui des centrales conventionnelles.

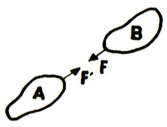
◆ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

RÉACTION (Reaction)

pages 62 à 64, 255, 269, 311, 314, 323, 337, 411, 445, 449, 454, 457, 474, 496.

Principe d'action et de réaction

On pose en principe que si un corps A exerce sur B une force F — l'action —, le corps B exerce sur A la force F′ — réaction — opposée à F, donc de même intensité, même direction, mais de sens contraire. Un poids de 1 kg posé sur une table exerce sur celle-ci une action égale à 1 kg-force. La table exerce sur le poids une réaction de 1 kgf, mais de bas en haut.



Propulsion par réaction

Lorsqu'on lance un projectile, on exerce une action sur ce projectile. Réciproquement, il exerce sur le lanceur une réaction de sens inverse. C'est le recul d'une arme à feu, par exemple. Il en est de même de l'éjection d'un gaz ou d'un liquide qui s'accompagne d'une réaction en sens inverse de la vitesse d'éjection. C'est le cas du tourniquet d'arrosage. En considérant le système *gaz éjecté — véhicule* comme isolé, on écrit que la quantité de mouvement reste constante. Cela amène à une expression simple de la poussée obtenue : $f = \mu v$

où μ est le débit du gaz (en kg/s) et v la vitesse d'éjection du gaz.

RÉACTION CHIMIQUE ◆ (Chemical reaction)

pages 63, 94, 265, 408, 440, 453, 457, 458, 491, 515.

◆ Se reporter à l'article : la Chimie, pages 117 à 119.

C'est un phénomène qui modifie la nature des corps en présence pour former des corps chimiques nouveaux, de propriétés différentes. On peut classer les réactions :

— suivant qu'elles produisent ou absorbent de la chaleur : réactions exothermiques ou endothermiques ;

— suivant qu'elles se produisent jusqu'à disparition complète d'un des réactifs (réactions complètes) ou non (réactions limitées). Dans ce dernier cas, la réaction directe est limitée par la réaction inverse et l'on aboutit à un équilibre statique où la composition du milieu reste constante.
Après s'être bornés à cataloguer les réactions, les chimistes se sont attachés à étudier les mécanismes des réactions ainsi que les lois générales permettant de les prévoir. C'est le but de la thermodynamique chimique : celle-ci montre qu'un système évolue jusqu'à ce que son entropie soit maximale (à énergie constante), et on déduit, par l'étude de fonctions thermodynamiques appropriées (énergie libre et enthalpie libre ♦), la possibilité d'une réaction ainsi que ses conséquences thermiques.

♦ Voir Fonctions d'état.

RÉCEPTEUR : voir Ohm (loi d') et les pages 266, 310, 312, 409, 450, 505.

RÉDUCTEUR-RÉDUCTION ♦ (Reducing-Reduction) pages 124, 411, 454.

♦ Se reporter à l'article : la Chimie, pages 124 à 126.

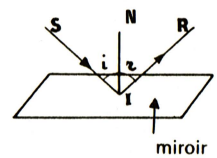
La réduction est la réaction inverse de l'oxydation. Elle correspond donc à un gain d'électrons par l'élément réduit. Quant au réducteur qui perd ces électrons, il est donc oxydé. On ne peut guère dissocier oxydation et réduction, c'est pourquoi l'on parle d'oxydo-réduction.

RÉDUCTION CATHODIQUE : voir Cathodique

RÉFLEXION ♦ (Reflexion) pages 172, 261, 267, 305, 352, 365 à 371, 408, 419, 431, 432, 436, 480, 487, 498, 512.

♦ Se reporter à l'article : l'Optique, pages 365 à 371.

Changement de direction d'un pinceau lumineux sur une surface polie (métal, verre, etc.), le rayon réfléchi se trouvant dans le même milieu que le rayon incident.
Les lois de la réflexion sont simples :
— le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence, plan défini par le rayon incident SI et la normale ♦ IN à la surface réfléchissante en I, point d'arrivée sur cette surface ;
— l'angle d'incidence i et l'angle de réflexion r sont égaux (voir figure ci-contre).

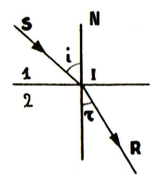


RÉFRACTION ♦ (Refraction) pages 29, 98, 115, 172, 268, 277, 305, 325, 352, 365 à 371, 399, 408, 480, 484, 494, 498, 506, 512.

♦ Normale : perpendiculaire en I au plan du miroir.

♦ Se reporter à l'article : l'Optique, pages 365 à 371.

Changement de direction, à la surface de séparation entre deux milieux transparents, du rayon lumineux qui pénètre d'un milieu dans l'autre.
Les lois de la réfraction sont dues à Descartes :
— Le rayon incident et le rayon réfracté sont dans le plan d'incidence ;
— L'angle d'incidence i est lié à l'angle de réfraction r par la loi :
$\sin i = n \sin r$, n étant l'indice de réfraction du milieu où entre le rayon (2) par rapport à celui d'où il sort (1). Si le milieu 1 est le vide, l'indice défini est l'indice absolu du milieu 2.
Lorsque le rayon va d'un milieu peu réfringent (air) à un milieu plus réfringent (verre), le rayon réfracté se rapproche de la normale, mais existe toujours. Dans le cas contraire, il arrive un moment où le rayon ne peut plus sortir du milieu le plus réfringent. Il y a réflexion totale (cela correspond à $i = 90°$ sur la figure, le rayon allant de 2 vers 1 ; c'est l'angle de réfraction limite).



RÉFRACTION (double) : voir Biréfringence

RÉFRINGENT (Refracting)

Milieu qui produit la réfraction. La réfringence est caractérisée par l'indice absolu du milieu. Un milieu très réfringent est un milieu d'indice élevé.

RELATIVITÉ (Relativity) pages 34, 35, 170, 172, 175, 180, 182, 183, 198, 256, 274, 278 à 288, 320, 330, 331, 332, 339, 341, 342, 417, 419, 421, 422, 426 et 427, 428, 444, 485, 510, 511, 514, 518, 534.

C'est en 1905 qu'Einstein établit les bases de la théorie de la relativité restreinte, qui introduisit une révolution dans la physique.
En 1905, la physique est dans une situation difficile : il semble que la lumière n'obéisse pas à la loi habituelle de composition des vitesses : la vitesse de la lumière des phares d'une voiture est la même, que la voiture soit au repos ou en mouvement. L'expérience qui montrait cela, imaginée par Michelson et Morley, avait été interprété par Lorentz en imaginant une contraction des longueurs due au mouvement. Mais tout cela n'était guère satisfaisant.

Relativité restreinte

Les principes de base de la physique classique sont :
— L'équivalence de tous les systèmes galiléens, c'est-à-dire tous les systèmes en translation uniforme par rapport à l'un d'eux ;
— L'existence d'un temps absolu, valable pour tous les systèmes (ce qui a pour conséquence une vitesse de la lumière variable d'un système à l'autre) ;

Einstein substitue à ces bases de la mécanique de Galilée et de Newton les postulats de la relativité restreinte :
— Tous les systèmes inertiels ♦ sont équivalents, non seulement pour la description d'un mouvement, mais pour toutes les lois physiques ♦. Celles-ci doivent donc s'exprimer de la même façon quel que soit le système ;
— La vitesse de la lumière est une constante universelle quel que soit le système adopté.

♦ Systèmes inertiels ou galiléens : systèmes en translation uniforme par rapport à l'un d'eux.

♦ Ce n'est pas le cas des lois de l'électromagnétisme en physique classique.

Ces postulats entraînent des conséquences importantes :
— L'impossibilité de définir une simultanéité absolue. C'est la fin de la notion de temps absolu.
— La contraction des longueurs et la dilatation du temps par rapport à ce qu'elles sont « au repos ». C'est l'interprétation de la transformation de Lorentz : si une longueur a une valeur l_0 dans son propre système S, un observateur en mouvement à la vitesse v par rapport à S lui trouvera une longueur :

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < l_0,$$ c étant la vitesse de la lumière.

Un temps t mesuré dans le système S correspondra pour l'observateur à un temps :

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} > t.$$

De plus, la nécessité de rendre les lois de la dynamique invariantes lorsqu'on leur applique la transformation de Lorentz conduit à l'équivalence masse-énergie : une particule a une énergie totale qui est la somme de l'énergie de masse $W = m_0c^2$ (m_0 = masse au repos) et de l'énergie cinétique de la particule.

Les effets relativistes peuvent s'interpréter formellement par une variation de la masse avec la vitesse, suivant la formule : $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$.

L'impossibilité de dissocier l'espace et le temps amène à concevoir un espace-temps à 4 dimensions (espace de Minkowski), qui n'est évidemment pas représentable. Dans cet espace-temps, la masse d'un système est donnée par la longueur invariable, dans la transformation de Lorentz, d'un vecteur ♦ de cet espace à 4 dimensions (quadrivecteur), le quadrivecteur impulsion-énergie. On retrouve donc, avec cette autre définition, une masse qui demeure constante, ce qui n'est pas en contradiction avec ce que nous avons dit au paragraphe précédent.

♦ Voir Aperçu mathématique, page 17.

Les principes de la relativité restreinte ont été vérifiés expérimentalement : l'équivalence masse-énergie est à la base des réactions de fission et de fusion ; le ralentissement du temps a été vérifié par l'étude de la vie moyenne des muons.

Relativité générale

La relativité restreinte s'applique à des systèmes en translation uniforme par rapport à l'un d'eux. La relativité générale s'applique à des systèmes en accélération — donc soumis à des forces. L'étude de ce problème a amené Einstein à l'étude du champ de gravitation. Il n'est pas aisé d'exprimer simplement la relativité générale. C'est à la fois une généralisation de la relativité restreinte et une théorie de la gravitation. La dynamique de Newton fait intervenir les forces d'inertie. Einstein imagine un espace non euclidien ♦ où l'intervention de ces forces n'est plus nécessaire. Une démarche analogue pour la gravitation amène à considérer que la présence de masses de gravitation produit une courbure de l'espace dans leur voisinage.

♦ Espace euclidien : espace géométrique classique à 3 dimensions, base du postulat d'Euclide.

Il résulte de ceci que, la courbure étant indépendante des objets placés dans cet espace, un photon ne s'y déplacera pas en ligne droite ; et là encore, la vérification expérimentale a été effectuée : un rayon lumineux passant au voisinage du Soleil se trouve dévié par celui-ci comme le montrent les observations faites au cours de l'éclipse du Soleil de 1919.

A la fin de sa vie, Einstein a cherché à généraliser encore sa théorie pour y inclure les champs électromagnétiques. C'est une des tentatives unitaires que la physique a connues, mais qui n'ont encore reçu aucune confirmation.

R.E.M.

Abréviation de « Röntgen Equivalent Man ».

Unité de mesure de l'effet biologique des radiations. C'est la « dose » qui produit le même effet sur l'individu qu'une irradiation par des rayons X à 250 000 volts ♦, abandonnant 10^{-5} joule dans 1 g de matière. (On nomme « rad » la dose de radiation produisant cette énergie). L'efficacité biologique relative (e.b.r.) est le coefficient permettant de passer du rad au rem : 1 rem = 1 rad × e.b.r. du rayonnement.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

La dose admise dans les centres nucléaires est de l'ordre de 0,4 rem par semaine.

RENDEMENT (Output)

Pour un moteur, le rendement est le rapport du travail que fournit le moteur

sur l'énergie que le moteur reçoit du combustible ; ce rapport est toujours inférieur à l'unité ♦.

Dans le cas d'un moteur thermique, le rendement est limité par le principe de Carnot, et cette limite, rendement théorique maximal, est exprimée par le théorème de Carnot ♦.

Dans d'autres domaines, on retrouve cette notion économique de rendement : on parlera en chimie du rendement d'une réaction, quotient de la quantité de produit obtenu par la quantité prévue par l'équation chimique de la réaction.

♦ Voir Théorème de Carnot.

♦ Voir ces mots.

RÉSEAU (System) pages 150, 236, 253, 393, 490, 502.

Réseau de diffraction

En optique, dispositif permettant d'obtenir la diffraction de la lumière ; le réseau le plus simple est une série de traits parallèles équidistants de quelques centièmes de millimètre. La lumière, tombant sur ce réseau, se diffracte et se trouve renvoyée dans des directions privilégiées, variables avec l'écartement des traits et la couleur de la lumière. On a, par ce moyen, des spectres qui sont utilisés de la même façon que ceux que fournit un prisme.

Par extension, tout système à structure périodique constitue un réseau de diffraction. (C'est la diffraction sur les gouttelettes d'eau qui produit le halo autour des lampadaires par temps brumeux.) Les cristaux ♦ constituent une structure périodique avec leurs ions répartis régulièrement dans la maille cristalline. Il en résulte une diffraction lorsqu'ils sont traversés par des rayons X, de longueur d'onde comparable aux dimensions de la maille.

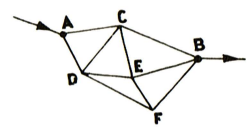
♦ Se reporter à l'article : le Cristal, pages 147 à 150.

Réseau de conducteurs

En électricité, on appelle « réseau » un ensemble de conducteurs disposés entre deux points A et B (voir la figure ci-contre). L'étude de ces réseaux repose sur les lois de Kirchhoff :

— loi des mailles ♦ : la somme des différences de potentiel aux bornes des conducteurs constituant une maille, telle que CDE ou BEF, etc., est nulle ;

— loi des nœuds ♦ : la somme algébrique des intensités aboutissant à un nœud est nulle, c'est-à-dire que la somme des intensités qui aboutissent à un nœud est égale à la somme des intensités qui en repartent.



♦ Maille : suite de conducteurs formant un circuit fermé.

♦ Nœud : point d'un réseau où aboutissent plusieurs conducteurs.

RÉSISTANCE (Resistance) pages 24, 186, 229, 233, 238, 240 et 241, 242, 243, 267, 308, 316, 325, 342, 355, 357, 358, 496, 510, 517.

Grandeur caractérisant l'effet calorifique du courant électrique dans un conducteur. En effet, la loi de Joule nous indique que l'énergie W apparue dans un conducteur est donnée par la relation $W = RI^2t$ où I est l'intensité, t le temps de passage du courant et R la résistance.

La résistance s'exprime en ohms (Ω). (C'est d'ailleurs la loi d'Ohm qui donne la définition de l'unité de résistance.)

RÉSISTIVITÉ (Resistivity) pages 156, 236, 509.

Si la résistance caractérise un conducteur, la résistivité joue ce rôle pour le matériau constituant ce conducteur.

Un conducteur cylindrique de longueur l et de section s a une résistance R donnée par : $R = \rho \frac{l}{s}$, où ρ est la résistivité exprimée en ohms par mètre.

Pour les conducteurs, la résistivité est très faible ; en voici quelques valeurs :

conducteurs :		semi-conducteurs :	
Cuivre	: $1{,}65.10^{-8}$ Ωm	Graphite	: 13.10^{-6} Ωm
Argent	: $1{,}65.10^{-8}$ Ωm	Germanium	: 0,47 Ωm
Fer	: 10.10^{-8} Ωm	Silicium	: 630 Ωm
Mercure	: 13.10^{-8} Ωm		

La résistivité varie avec la température, suivant une loi approximativement linéaire pour les conducteurs usuels : si ρ_0 est sa valeur à 0 °C, à t °C elle vaut :

$$\rho = \rho_0(1 + at)$$

a est le coefficient de température, qui vaut sensiblement $\frac{1}{250}$ pour les métaux purs.

Les semi-conducteurs ont une résistivité qui diminue fortement lorsque la température augmente, suivant une loi exponentielle ♦. Cela est dû à la différence de nature entre la conduction dans ces deux types de matériaux ♦.

♦ Voir Aperçu mathématique, page 21.

♦ Se reporter à l'article : l'Électronique, page 236.

RÉSONANCE (Resonance) pages 64, 66, 73, 310, 347, 440, 464 et 465, 486, 526.

En physique des vibrations, la résonance est le phénomène qui se produit lorsqu'un système susceptible de prendre des oscillations est excité par un mouvement vibratoire dont la fréquence est égale à celle des oscillations que peut prendre le système. Dans ce cas, il oscille avec une amplitude qui peut être beaucoup plus grande que celle des oscillations de l'excitateur. L'exemple le plus simple est l'escarpolette : les oscillations de l'excitateur (le « pousseur ») sont rythmées sur la période des oscillations de l'escarpolette qui joue le rôle de résonateur, et peut prendre de grandes amplitudes. Le phénomène est d'autant plus net qu'il est moins amorti par les frottements de toute sorte. Lorsque le système est très amorti, il prend des « oscillations forcées » pour une période excitatrice quelconque, et avec une amplitude faible, indépendante de la période (cas d'un haut-parleur ♦).

♦ En effet, un haut-parleur ne doit pas favoriser certaines fréquences qui apparaîtraient avec des amplitudes trop fortes par rapport à celles des autres fréquences.

On trouve le phénomène de résonance dans tous les domaines : résonance mécanique ou acoustique des tuyaux de l'orgue ou des cordes d'un violon, si ce n'est d'une tôle produisant à une certaine vitesse le bruit — hantise de l'automobiliste ; résonance électrique, utilisée dans les circuits d'accord d'un poste récepteur permettant de régler celui-ci sur la fréquence de l'émetteur.

En physique nucléaire, on appelle résonance la formation d'un noyau composé sous l'action d'un bombardement de corpuscules (neutrons, par exemple). Ce noyau qui reçoit ainsi une énergie importante la restitue plus ou moins rapidement en émettant un photon gamma.

RÉSONANCE MAGNÉTIQUE (Magnetic resonance) pages 105, 115, 133

Lorsqu'on soumet un corps à un champ magnétique variable, il existe certaines fréquences pour lesquelles les corpuscules qui ont un moment magnétique entrent en résonance avec le champ excitateur, ce qui est mis en évidence par des méthodes diverses, comme la mesure de la force électromotrice induite par les oscillations des moments magnétiques. Cela constitue une méthode de mesure très sensible des moments magnétiques.

La même méthode appliquée au noyau permet de déterminer le moment magnétique nucléaire, et particulièrement celui du proton et du neutron. (Remarquons que le neutron, particule neutre, possède pourtant un moment magnétique.)

RÉTICULAIRE (énergie) : voir Energie réticulaire et la page 86.

RÉTICULAIRE (structure) : voir le Cristal pages 147 à 155.

RETOMBÉES RADIOACTIVES (Radioactive fall out)

Une explosion nucléaire, particulièrement du type « bombe à fission », produit des corps radioactifs de périodes plus ou moins longues qui vont être entraînés par les mouvements de l'atmosphère, avant de retomber, quelquefois très longtemps après l'explosion et très loin du lieu de celle-ci. Si les produits de courte période s'éliminent rapidement, certains corps sont plus dangereux. Par exemple, le strontium 90, de période 28 ans, est produit en abondance. Or les plantes l'absorbent, et les humains également par l'intermédiaire du lait. Cet exemple montre, s'il en était besoin, la gravité du problème posé par les armements nucléaires.

RÖNTGEN (Wilhelm Konrad von)

Wilhelm Konrad von Röntgen (Viollet)

Physicien allemand, né à Lennep (Rhénanie) en 1845, mort à Munich en 1923. Premier prix Nobel de physique (1901), Röntgen doit sa célébrité mondiale à la découverte des rayons X. Professeur de physique dans les universités de Strasbourg, de Giessen, de Wörzburg et de Munich, universellement connu et estimé, il reste toutefois voué à la recherche.

En 1885, il démontre que le mouvement d'un diélectrique polarisé a les mêmes effets magnétiques qu'un courant. En 1895, enveloppant un tube de Crookes de papier noir, il constate qu'un écran fluorescent s'illumine au voisinage d'une ampoule à rayons cathodiques, ou qu'une plaque photographique peut être impressionnée. Ignorant la nature de ce nouveau rayonnement, Röntgen l'appelle rayonnement X. Poursuivant ses recherches, il en définit alors les propriétés : ces rayons ne sont pas déviés par un champ magnétique ni électrique ; ils gardent un parcours rectiligne, quels que soient les objets disposés sur leur passage ; ils ne peuvent être ni réfléchis ni réfractés. Il signale également que les corps électrisés se déchargent sous leur action et qu'ils produisent une ionisation de l'air.

Röntgen poursuit alors ses recherches dans de nombreuses autres branches de la physique ; on lui doit notamment des travaux sur l'élasticité, sur la capillarité et la chaleur spécifique des gaz, sur la conduction de la chaleur dans les cristaux, sur la rotation électromagnétique de la lumière polarisée et sur la piézoélectricité.

Ouvrage essentiel :
Zur Geschichte der Physik (Sturits, Würzburg, 1894).

RÖNTGEN pages 82, 151, 313, 490.

Unité de quantité de radiation : c'est la quantité qui produit, par ionisation, dans 1 cm³ d'air une quantité d'électricité de $\frac{1}{3.10^9}$ coulomb, ce qui correspond à une libération d'énergie de $0{,}108.10^{-7}$ joule par cm³ d'air.

RUTHERFORD (Ernest) pages 34, 35 à 38, 57, 62, 83, 98, 272, 275, 289, 518.

(Viollet)

Ernest Rutherford

Physicien anglais, né à Nelson (Nouvelle-Zélande) en 1871, mort à Cambridge en 1937.

L'une des figures les plus importantes du début du siècle, Rutherford est aussi célèbre pour ses découvertes personnelles que pour son influence sur toute une école de physiciens, se faisant le défenseur des nouvelles conceptions fondamentales en physique.

Élève de Joseph John Thomson à Cambridge, il est ensuite nommé professeur à Montréal, à Manchester, puis à Cambridge où il dirige le Laboratoire Cavendish. Membre de la Royal Society, dont il devient président en 1925, il reçoit le prix Nobel de chimie pour 1908. Ses recherches, qui portent essentiellement sur la radiation et sur la structure atomique, sont à la base de la physique nucléaire moderne.

Le premier ouvrage de Rutherford est la mise au point d'un détecteur d'ondes électromagnétiques. Après avoir étudié avec J.J. Thomson le phénomène de l'ionisation gazeuse, il découvre en 1899 la radioactivité du thorium et montre son appartenance à la famille des gaz rares.

Il distingue alors les particules alpha et bêta dans le rayonnement du radium et de l'uranium, puis en 1900 crée avec Soddy ♦ la théorie moderne de la radioactivité en énonçant la loi des transformations radioactives : tout processus d'ionisation, produit à partir d'une substance radioactive, provient de particules ou de radiations émises à partir de cet atome.

♦ Frederick Soddy, physicien britannique, né en 1877, mort en 1956, prix Nobel de chimie en 1921 ; il fut l'un des premiers à suggérer l'existence des isotopes.

En 1906, il montre que les particules alpha sont constituées par des noyaux d'hélium. Il commence alors à imaginer la structure de l'atome comme une structure de type planétaire, avec un noyau central où est condensée en un espace réduit toute la charge positive et des électrons satellites, de charge négative et situés à des grandes distances. Cette théorie atomique est probablement sa plus grande contribution à la physique. Il réussit d'ailleurs à démontrer expérimentalement sa conception en employant les particules émises par des atomes radioactifs.

Rutherford se consacre alors à des travaux qui confirment sa théorie et ouvrent de nouveaux domaines à la recherche.

En 1908, il calcule avec Geiger l'énergie libérée dans les transformations radioactives.

En 1919, il obtient la première désintégration provoquée d'un atome : la transmutation de l'azote en oxygène, en bombardant du radium avec des rayons alpha ; puis il reproduit avec succès son expérience sur tous les éléments. Enfin, il détermine avec Francis William Aston la masse du neutron.

Ouvrages essentiels :

Radioactivity (University Press, Cambridge, 1905) ;
Radioactive Transformations (Scribner, New York, 1906) ;
Radiations from Radioactive Substances (University Press, Cambridge, 1951) ;
Collected papers (Allen & Unwin, Londres, 1962-1965).

S

SCHRÖDINGER (Erwin) pages 110, 176, 276, 291, 361, 455.

(Keystone)
Erwin Schrödinger

Physicien autrichien, né à Vienne en 1887, mort en 1961. Professeur à Stuttgart, à Breslau, à Zurich puis à Munich, Schrödinger quitte son pays natal en 1933 pour s'établir à Oxford puis à Dublin et ne revient définitivement à Vienne qu'en 1955. Il reçoit le prix Nobel de physique en 1933, avec Paul Dirac.
Les premiers travaux de Schrödinger le portent vers divers domaines de la physique théorique : théorie de la probabilité en thermodynamique, théorie des couleurs de Boltzmann. Puis il se consacre à des recherches sur la théorie ondulatoire et connaît en ce domaine des succès qui lui valent rapidement une renommée mondiale.
Poursuivant les travaux de Bohr, de De Broglie et de Heisenberg, il applique la mécanique ondulatoire à l'atome grâce à son calcul opératoire (équation de Schrödinger).
Il approfondit le parallélisme entre les aspects ondulatoire et corpusculaire des phénomènes, montre l'identité de la mécanique ondulatoire avec la mécanique matricielle. Quant à son équation, elle pose les bases des méthodes modernes de la mécanique quantique.
Membre de huit académies, ce savant est également un grand humaniste.

Ouvrages essentiels :
Mémoires sur la mécanique ondulatoire (Alcan, Paris, 1933) ;
Qu'est-ce que la vie ? (Club français du livre, Paris, 1949) ;
Science et humanisme (Desclée, Bruges, 1954) ;
Uber Indeterminismus in der Physik ist die Naturwissenschaft milieubedingt (Barth, Leipzig, 1932) ;
Meine Weltansicht (P. Zsolnay, Vienne, 1961) ;
Was ist Naturgesetz ? (Oldenbourg, Vienne, 1962) ;
Space-time structure (University Press, Cambridge, 1950) ;
Studies in the generalized theory of gravitation II (Dublin Institute for advanced studies, Dublin, 1951) ;
Nature and the Greeks (University Press, Cambridge, 1954) ;
Expanding universe (University Press, Cambridge, 1956) ;
Science, theory and man (Allan & Unwin, Londres, 1957).

SCHRÖDINGER (équation de) (Schrödinger's equation)

La conséquence du principe d'incertitude de Heisenberg est qu'on ne peut définir la trajectoire d'une particule et qu'on doit se contenter de déterminer la probabilité de présence de cette particule en chaque point de l'espace.

Pour déterminer cette probabilité, on associe à une particule une fonction mathématique ψ des coordonnées du point et du temps, qu'on appelle la fonction d'onde. La mécanique quantique permet de prévoir le résultat d'une expérience sur les particules par la connaissance de cette fonction ψ, qu'il faut donc déterminer. C'est le but de l'équation de Schrödinger, dont les solutions donnent les expressions possibles de ψ. Si on considère un état stationnaire, c'est-à-dire indépendant du temps, et en considérant des électrons en mouvement autour d'un noyau fixe (approximation de Born-Oppenheimer), on doit rechercher les valeurs de ψ qui sont solutions de l'équation :

$$-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\Delta\psi = (E - V)\,\psi,$$

où $\Delta\psi$ désigne le laplacien ♦ de ψ; h est la constante de Planck, E l'énergie du système électrons/noyau, V l'énergie potentielle du système, et m la masse de l'électron.

♦ Voir Aperçu mathématique, page 20.

La résolution de cette équation, de façon rigoureuse pour l'atome d'hydrogène et approximative pour les atomes plus complexes, permet, en retrouvant toutes les conditions de quantification, de déterminer les probabilités de trouver un électron dans un état donné en un point donné, autrement dit de définir les différentes orbitales.

SEABORG (Glenn Theodore) page 478.

Chimiste et physicien américain, né à Ispheming (Michigan) en 1912. Diplômé de l'université de Californie, Seaborg y devient professeur de chimie et codirecteur du laboratoire de radiation.

Président de la Commission à l'énergie atomique, il reçoit le prix Nobel de chimie en 1951.

De 1940 à 1955, ses travaux en microchimie le mènent à la découverte de huit nouveaux éléments : le plutonium (1941), connu pour sa puissance nucléaire et son pouvoir d'explosif, l'américium, le curium, le berkelium, le californium, l'einsteinium, le fermium et le mendélévium ♦. Il met également au point les méthodes d'extraction du plutonium dans la pile à uranium.

♦ Voir le tableau périodique de Mendéléïev, pages 42 et 43.

Enfin, il prédit l'existence d'une quatrième famille radioactive, celle du neptunium.

Ouvrages essentiels :

Les Éléments transuraniens artificiels (Dunod, Paris, 1967) ;
The Actinide Elements (MacGraw Hillbook Cie, New York, 1954) ;
Elements of the Universe (Methuen & Cie, Londres, 1959).

SEMI-CONDUCTEURS ♦ (Semiconductors) pages 141, 176, 178, 229, 231, 236 à 240, 244, 273, 276, 315, 353, 410, 452, 482, 497, 504, 521, 539.

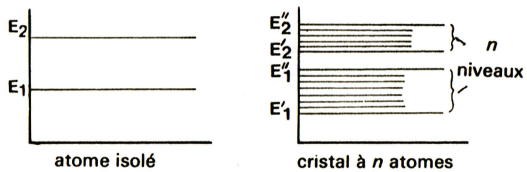
♦ Se reporter aux articles : le Cristal, pages 158 et 159, et l'Électronique, pages 236 à 240.

Éléments dont la conductibilité est intermédiaire entre les conducteurs métalliques et les isolants.

Le mécanisme de la conduction dans ces corps peut se schématiser par la théorie des bandes : les électrons d'un atome isolé peuvent occuper des niveaux d'énergie discrets ♦. Lorsque les atomes constituent un cristal, chacun des niveaux se « démultiplie » en autant de niveaux, discrets mais très voisins, qu'il y a d'atomes. Il en résulte qu'on doit substituer, à l'énergie d'un niveau, bien fixée, une bande pratiquement continue, où il suffit de très peu d'énergie pour faire passer un électron d'un niveau à un autre à l'intérieur de cette même bande.

♦ Discrets ou discontinus.

Si l'on considère un cristal formé d'atomes, ceux-ci sont normalement dans leur



E_1, E_2 : niveaux d'énergie des électrons d'un atome isolé.
E'_1, E''_1, E'_2, E''_2 : bandes d'énergie possibles pour les électrons d'un cristal à *n* atomes.

état fondamental. Les derniers niveaux occupés sont ceux des électrons s'échangeant lors des liaisons chimiques : ce sont les électrons de valence. Dans le cristal, une bande de « valence » correspond à ces électrons. Les électrons pourraient, dans un état excité, passer sur la bande d'énergie supérieure, normalement vide. C'est la bande de conduction.

Un semi-conducteur est un corps dont :
— tous les niveaux de la bande de valence sont occupés ;
— la bande « interdite », comprise entre bande de valence et bande de conduction, est étroite.
Dans ces conditions, l'agitation thermique peut fournir aux électrons une énergie suffisante pour que quelques-uns sautent la bande interdite et se trouvent dans la bande de conduction, et cela se produira d'autant plus facilement que la température est élevée. Le semi-conducteur voit sa conductibilité augmenter avec la température.

A cette conduction par électrons se superpose un autre phénomène : le départ des électrons de la bande de valence a laissé autant de « trous », qu'on peut considérer comme positifs au milieu des électrons négatifs. Un électron peut se déplacer pour combler un trou, tout en laissant un autre trou à l'endroit d'où il est parti. Tout se passe comme si les trous se propageaient... On parle de conduction par trous ♦. Ce sont les deux mécanismes que nous venons d'envisager qui produisent, concurremment, la conduction dont on observe le résultat global. Nous venons d'envisager le mécanisme de conduction dans les semi-conducteurs formés de cristaux purs. On parle dans ce cas de semi-conducteurs intrinsèques. Les principaux semi-conducteurs sont des éléments tétravalents (colonne du carbone dans la classification périodique) : germanium, silicium.

♦ Voir l'article : l'Électronique, pages 237 et suivantes.

Rôle des impuretés

Celles-ci modifient profondément la conduction, même lorsqu'elles sont en quantité minime. On parle dans ce cas de semi-conducteurs extrinsèques. Supposons donc un cristal de germanium dans lequel on a ajouté de l'antimoine ou de l'arsenic, à raison de 1 atome pour 1 000 000 ou 1 000 000 000. L'antimoine, comme l'arsenic, a 5 électrons de valence. Lorsque, dans le réseau cristallin, il remplace un atome de germanium à 4 électrons, il se trouve un électron en surnombre : le résultat est un cristal que ces électrons libres rendent beaucoup plus conducteur que le cristal pur. C'est un semi-conducteur extrinsèque du type *n* (pour « négatif »).
Si on introduit une impureté à 3 électrons de valence (indium...), on obtient un semi-conducteur de type *p* (pour « positif »). Dans ce cas, la conduction extrinsèque est due aux « trous » introduits dans le réseau par le manque d'électrons.
Les applications des semi-conducteurs et surtout des ensembles de semi-conducteurs sont de plus en plus importantes : diodes à germanium formées par 1 jonction entre deux cristaux *n* et *p*, transistors, formés de 3 zones *n-p-n* ou *p-n-p*, sans

compter les cellules photorésistantes, dans lesquelles la lumière excitatrice augmente la conductibilité et permet une mesure du flux lumineux (cellules CdS ♦ des appareils photographiques).

♦ CdS : sulfure de cadmium.

SÉRIES RADIOACTIVES ♦ (Radioactive series) pages 257, 488, 501.

♦ Se reporter à l'article : l'Atome, pages 47, 48 et 61.

L'étude de la radioactivité a montré que le produit d'une désintégration radioactive pouvait être lui-même radioactif. On a ainsi des filiations successives formant une série ou famille radioactive, aboutissant à un élément stable. Donnons comme exemple la famille de l'uranium-radium : l'uranium 238, par désintégrations successives alpha ou bêta, aboutit au plomb 206 :

uranium 238		thorium 234		protoactinium 234		uranium 234		thorium 230
$^{238}_{92}U$ (4,6. 10^7 siècles)	$\xrightarrow{\alpha}$	$^{234}_{90}Th$	$\xrightarrow{\beta}$	$^{234}_{91}Pa$	$\xrightarrow{\beta}$	$^{234}_{92}U$ (2,7. 10^6 ans)	$\xrightarrow{\alpha}$	$^{230}_{90}Th$ ---

radium 226		radon 222		polonium 218		astate 218		bismuth 214
$\xrightarrow{\alpha}$ $^{226}_{88}Ra$	$\xrightarrow{\alpha}$	$^{222}_{86}Rn$ (3,6 jours)	$\xrightarrow{\alpha}$	$^{218}_{84}Po$	$\xrightarrow{\beta^-}$	$^{218}_{85}At$ (2 secondes)	$\xrightarrow{\alpha}$	$^{214}_{83}Bi$ ---

polonium 214		plomb 210		bismuth 210		polonium 210		plomb 206
$\xrightarrow{\beta}$ $^{214}_{84}Po$	$\xrightarrow{\alpha}$	$^{210}_{82}Pb$ (22 ans)	$\xrightarrow{\beta^-}$	$^{210}_{84}Bi$ (138 jours)	$\xrightarrow{\beta}$	$^{210}_{84}Po$ (138 jours)	$\longrightarrow$	$^{206}_{82}Pb$ STABLE

On a noté quelques périodes des éléments intermédiaires. Remarquons également qu'il y a d'autres modes de désintégration possibles entre $^{218}_{84}Po$ et $^{210}_{82}Pb$.

SERPOUKOV pages 421, 511.

Centre de recherches soviétique, dans la région sud de Moscou, où est installé le synchrotron à protons de 70 GeV ♦.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 14.

SHOCKLEY (William Bradford) page 522.

Physicien et technicien américain, né à Londres en 1910.
Diplômé du Massachusetts Institute of Technology, Shockley entre dans les services techniques de la compagnie téléphonique Bell. Il y poursuit des expériences qui le conduisent à l'invention du transistor puis au développement de ses différentes formes. Pour ces travaux, il reçoit en 1956 le prix Nobel de physique, qu'il partage avec ses collaborateurs.
Par ailleurs, il effectue, pendant la Seconde Guerre mondiale, des recherches sur la détection des sous-marins pour les services de la marine américaine où il est nommé expert-conseil.

SILICIUM (Silicon)

Élément de la famille du carbone (de symbole Si ♦), dont les propriétés cristallines sont voisines : cristallisé dans le système cubique ♦ (comme le diamant), le silicium fond à 1 420 °C. Bien que plus difficile à obtenir pur que le germanium,

♦ Masse atomique = 28 ; numéro atomique = 14.

♦ Voir l'article : le Cristal, pages 151 et 152.

il est utilisé pour la fabrication de semi-conducteurs en raison de sa meilleure tenue à l'échauffement.

SOLIDE (Solid) pages 24, 85, 178, 179, 215, 217, 268, 305, 317, 332, 342, 349, 410, 441, 442, 444, 447, 507, 519, 526, 527, 532.

État de la matière presque synonyme, en physique moderne, de cristal. Si la structure du solide a été mystérieuse pendant longtemps, la « physique du solide » s'est beaucoup développée au cours de notre siècle. Après l'étude des formes cristallines par les rayons X, l'application de la théorie quantique a permis d'élucider nombre de problèmes : l'un des plus importants est la conduction électrique et thermique. Nous avons dit que solide et cristal sont presque synonymes. Encore faut-il savoir que les solides sont en général formés de micro-cristaux enchevêtrés et que les propriétés sont très différentes de celles du cristal unique. Des recherches sont faites actuellement sur la réalisation de fibres mono-cristallines, dont la résistance à la rupture serait incomparablement supérieure à celle du matériau usuel, polycristallin, de même section.

SOLIDIFICATION (Solidification) page 166.

Passage de l'état liquide à l'état solide. C'est l'inverse de la fusion, mais les lois de la fusion s'appliquent à la solidification, car la température de fusion et celle de solidification d'un corps pur sont identiques.

SOLUTION ♦ (Solution) pages 88, 340, 531.

♦ Pour bien comprendre cet article, lire d'abord Ionisation, et l'article : le Cristal, page 162.

Mélange homogène de deux ou de plusieurs substances.

Solutions liquides

Deux cas peuvent se présenter :

— La dissolution du corps dans le solvant ♦ ne s'accompagne d'aucune ionisation. C'est le cas des solvants organiques (alcools, benzine, trichloréthylène, etc.). La dissolution est alors une conséquence de l'association des molécules du solvant avec celles du soluté.

♦ Solvant : c'est le produit, majoritaire dans le mélange, qui dissout l'autre, ce dernier étant le soluté.

— Le solvant est ionisant (eau, ammoniac liquide, etc.). La dissolution résulte alors de la dissociation de l'édifice du soluté, par diminution des forces électrostatiques entre ions positif et négatifs (dans l'eau, ces forces sont divisées par 80 et ne suffisent plus à maintenir la cohésion du cristal).

Solutions solides

La plupart des alliages sont de ce type. Elles peuvent se produire suivant deux modes :

— L'atome (ou l'ion) du solvant et celui du soluté sont de dimensions et de structure électronique voisines. Un ion cuivre prend la place d'un ion or dans le réseau cristallin de l'or. C'est une solution de substitution.

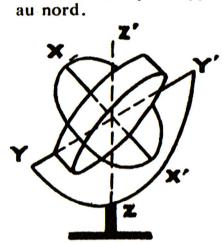
— L'atome (ou l'ion) du soluté est plus petit que l'atome (ou l'ion) du solvant et vient s'insérer dans les lacunes de l'édifice cristallin. C'est une solution d'insertion, qu'on rencontre dans les aciers (solution de carbone dans le fer).

SOMMERFELD (Arnold) pages 276, 290.

Physicien et mathématicien allemand, né à Königsberg en 1868, mort à Munich en 1951.

Détenteur d'une chaire de physique théorique à Aix-la-Chapelle puis à Munich, Sommerfeld se penche d'abord sur la théorie du gyroscope ♦. Appliquant à l'atome la mécanique relativiste en même temps que la théorie des quanta, il réussit en 1918 à prévoir, avec une grande approximation, l'emplacement des raies dans le spectre de l'hydrogène puis dans celui de l'hélium ionisé, expliquant ainsi la « structure fine » des raies spectrales.
Orientant ensuite ses recherches vers le magnétisme, il introduit la quantification des moments dans la théorie statistique du magnétisme et développe les théories de la diffraction, de la propagation des ondes électromagnétiques et des électrons de conductivité dans les métaux.
On lui doit, enfin, la définition du nombre quantique azimutal ♦.

♦ Gyroscope : roue de masse importante (volant) qu'on peut mettre autour d'un axe. Sur une articulation à la Cardan, le gyroscope a la propriété de maintenir son axe de rotation XX' sur une direction fixe, quel que soit le mouvement du support auquel est lié l'axe ZZ'. Cette propriété le fait utiliser dans des compas de navigation (compas gyroscopiques), où un réglage préalable permet de repérer la direction XX' par rapport au nord.



Ouvrages essentiels :
La Constitution de l'atome et les raies spectrales (Blanchard, Paris, 1923) ;
Die willkürlichen Functionen in der mathematischen Physik (Druck von Leupold, Königsberg, 1891) ;
Mathematische Annalen (Teubner, Leipzig, 1898) ;
Über die Theorie des Kreisels, in vier Helten (Leipzig, 1897-1910) ;
Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie (K. B. Academie, Munich, 1909).

SON ♦ (Sound)

pages 24, 85, 178, 179, 215, 217, 268, 305, 317, 332, 342, 349, 410, 441, 442, 444, 447, 507, 519, 526, 527, 532.

Le son est une vibration susceptible d'agir sur le récepteur physiologique qu'est l'oreille. Il est produit par les vibrations de corps matériels, aussi bien solides que fluides : on obtient un son en frappant les lames d'un xylophone ou d'un diapason, ou en mettant en vibration l'air d'un tuyau d'orgue.
A la différence des ondes électromagnétiques, les ondes sonores ont besoin d'un milieu matériel pour se propager. Aucun son ne se propage dans le vide.
La vitesse de propagation (ou célérité) du son dépend du milieu où il se propage.

♦ Voir l'article : l'Atome, page 40.

♦ Se reporter à Fréquence, Timbre, et à l'article : l'Électronique, pages 214 à 217.

Dans l'air sec à 0°C, sous la pression atmosphérique, cette vitesse est de 331 m/s.
Voici quelques valeurs de la vitesse du son dans d'autres milieux :

azote	(0°C, 76 cm de mercure)	:	329 m/s
hydrogène	» »	:	1 258 m/s
eau	» »	:	1 435 m/s
acier	» »	:	5 000 m/s
fonte	» »	:	3 700 m/s

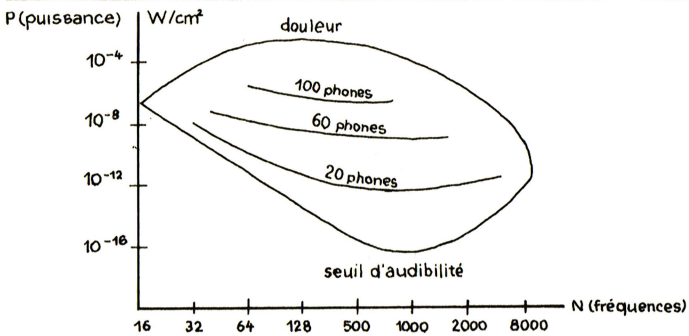
L'oreille humaine perçoit les vibrations sonores dont les fréquences sont comprises entre 20 hertz et 10 000 hertz environ. Encore faut-il préciser que la sensibilité de l'oreille dépend de la fréquence : nulle aux fréquences limites, elle est maximale aux environs de 2 000 hertz. La fréquence de la vibration correspond pour le musicien à la hauteur du son émis.

« Seuil d'audibilité » et « seuil de douleur »

L'intensité du son est plus délicate à définir : en effet, deux sons correspondant à la même puissance vibratoire peuvent produire des effets différents suivant leur fréquence. On va donc se placer d'abord au voisinage du maximum de sensibilité, c'est-à-dire de la fréquence entre 1 000 Hz et 3 000 Hz ♦. A ces fréquences, il faut une puissance : $P_0 = 10^{-16}$ W/cm² pour que l'oreille perçoive le son. On affecte à ce niveau l'intensité 0. La puissance correspondant au maximum supportable (seuil de douleur) est $P_1 = 10^{-3}$ W/cm², donc 10^{13} (10 000 000 000 000) fois plus

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

grande! On pose que la différence d'intensité entre les deux niveaux est de 13 bels (B) ♦ ou de 130 décibels (dB) ♦.
Notons, d'autre part, que la différence minimale d'intensité sonore que peut percevoir l'oreille est de l'ordre du décibel.
Que se passe-t-il hors du domaine 1 000-3 000 Hz envisagé? Une source émettant une puissance de 10^{-14} W/cm², donc d'intensité 20 dB, est à peine audible à la fréquence 250 Hz, ce qui s'exprime en disant que sa sonorie est nulle. On évaluera les niveaux sonores, ou sonories, en comparant l'effet sur l'oreille du son étudié et celui d'un son de fréquence comprise entre 1 000 et 3 000 Hz. Si l'effet est, par exemple, le même que celui d'un son d'une intensité correspondant à 20 dB, on dira que la sonorie est de 20 phones.
On peut tracer ainsi la courbe de sensibilité de l'oreille et y faire figurer les lignes d'égale sonorie.
Cette courbe est une moyenne et varie suivant les individus.



Voici, pour terminer, quelques niveaux sonores :
proximité d'un moteur à réaction : 120-130 phones ;
orchestre : 60 phones ;
métro en souterrain : 80 phones ;
conversation : 40 phones.

♦ En souvenir d'Alexander Graham Bell. Né à Edimbourg (Écosse) en 1847, mort à Baddeck (Nouvelle-Écosse) en 1922. Après des études à Edimbourg et à Londres, il se rend au Canada, puis il ouvre à Boston une école d'éducateurs pour sourds-muets, et devient professeur à l'Université de Boston. Il étudie la transmission du son par l'électricité et réalise ainsi le premier téléphone, et autres inventions consacrées également à la reproduction des sons.

♦ Cela correspond au remplacement de l'échelle des puissances par une échelle logarithmique : en effet, en prenant le logarithme décimal des puissances, on trouve : $\log P_1 = -3$, $\log P_0 = -16$, donc $\log \frac{P_1}{P_0} = \log P_1 - \log P_0 = 13$. L'opération est justifiée non seulement par une question d'échelle, mais aussi par la loi physiologique de Fechner selon laquelle « la sensation croît comme le logarithme de l'excitation ».

SON PUR ou SON SIMPLE (Pure sound)

Son provenant d'une vibration sinusoïdale, de fréquence bien déterminée. Les sons musicaux, dits sons complexes, sont généralement des superpositions de sons purs ♦.

SPECTRE - SPECTROGRAPHE - SPECTROSCOPIE (Spectrum, Spectrograph, Spectroscopy)

pages 27, 34, 83, 101, 115, 127, 188, 190, 216, 227, 233, 264, 310, 319, 345, 347, 362, 394, 428, 450, 452, 488, 491, 496, 505, 538.

Spectre visible

Dans certaines conditions, une lumière non monochromatique se trouve décomposée en ses radiations constituantes. Cela peut se produire soit par réfraction sur un prisme, soit par diffraction sur un réseau. Quel que soit le moyen employé, le résultat est d'obtenir, à partir d'un faisceau initial unique, autant de faisceaux émergents qu'il y a de radiations présentes dans la lumière primitive. On obtient ainsi le spectre du rayonnement incident.

Si on observe directement ce spectre, l'appareil employé s'appelle un spectroscope. Si on forme l'image des spectres sur une phaque photographique, l'appareil utilisé est un spectrographe.

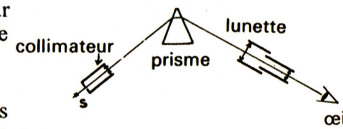
Spectroscope

Un spectroscope simple comprend :

— un collimateur, dont le rôle est de donner, à partir d'une fente éclairée par la lumière à étudier, un faisceau de rayons parallèles réalisant en quelque sorte une image à l'infini de la fente ;

— un prisme, qui reçoit le faisceau venant du collimateur et le dévie ;

— dans la direction moyenne des faisceaux émergents se trouve une lunette dans laquelle on observe les images colorées de la fente, qui constituent le spectre, et dont on peut déduire les longueurs d'onde correspondantes.



L'étude des spectres a permis de se rendre compte que chaque élément chimique donnait des raies caractéristiques. On peut donc identifier un élément par son spectre, et c'est ainsi qu'on peut affirmer que les étoiles ne sont pas constituées d'autres éléments que ceux qu'on trouve dans notre système solaire.

C'est aussi de l'observation du spectre de l'hydrogène qu'est née l'idée de la quantification de l'énergie de l'atome.

Spectre ultraviolet et infrarouge

L'utilisation de la plaque photographique jointe à des prismes en quartz pour l'ultraviolet a permis d'étendre le domaine de la spectroscopie. Dans le domaine de l'infrarouge, les spectres renseignent sur la structure des molécules, tant minérales qu'organiques, et la nature des liaisons existant entre leurs atomes.

Spectre de rayons X

Il est possible, par diffraction, d'obtenir des spectres de rayons X. On a pu se rendre compte que ce spectre dépendait de la tension d'accélération des électrons et du métal de l'anticathode, chaque métal ayant des raies caractéristiques, dont la fréquence ν est une fonction du numéro atomique Z : $\nu = A(Z - b)^2$, où A et b sont des constantes.

Cette loi (loi de Moseley) est une des justifications expérimentales de la classification périodique.

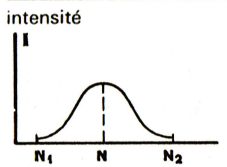
SPECTRE SONORE ♦ (Sound spectrum)

♦ Voir l'article : l'Électronique, pages 215 à 217.

♦ Voir Timbre.

On peut représenter le résultat de l'analyse d'un son par son spectre sonore, dans lequel on représente, en fonction des fréquences, l'intensité (ou l'énergie) du son correspondant aux différents harmoniques ♦.

Dans le cas de la parole, on étudie la répartition statistique des fréquences et de l'énergie (ou de l'intensité sonore) transportée par chaque fréquence. On obtient alors un diagramme tel que celui de la figure ci-contre. La fréquence moyenne N (celle qui correspond à l'énergie maximale) donne le ton général de la voix et permet de différencier un ton aigu d'un ton grave.



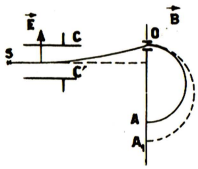
SPECTROGRAPHE DE MASSE (Mass spectrograph)

pages 31, 86, 127, 324, 518, 520.

Cet appareil ♦ permet de déterminer, par l'étude de l'action combinée d'un champ électrique et d'un champ magnétique sur un faisceau de particules ionisées, la masse des particules et leur abondance dans le faisceau.

♦ Le spectrographe de masse est un des instruments les plus précieux de l'analyse chimique.

Le principe de l'action des champs électrique et magnétique a permis à J.J. Thomson de réaliser le premier spectrographe de masse, avec lequel il découvrit les isotopes du néon. Les spectrographes actuels dérivent du spectrographe d'Aston, dont le principe est comparable à celui de J.J. Thomson mais qui donne des résultats plus facilement exploitables.



Principe du spectrographe de masse

Une source S émet les particules ionisées et les accélère. Le faisceau produit passe entre C et C', plaques entre lesquelles règne un champ électrique $\vec{E}$ déviant les particules. On démontre que la déviation de la particule, pour un champ donné, est proportionnelle à l'énergie cinétique $\frac{1}{2}mv^2$ ♦. Seules passeront au travers de l'orifice O celles qui auront une énergie cinétique donnée : $\frac{1}{2}mv^2 = K$, ou $m^2v^2 = 2Km$, ou encore $mv = \sqrt{2K}\sqrt{m}$, où K est une constante ; la quantité de mouvement est donc proportionnelle à la racine carrée de la masse.

♦ m = masse ; v = vitesse.

Les particules tombent ensuite dans un champ magnétique $\vec{B}$ perpendiculaire au plan de la figure. Elles décrivent, comme dans un cyclotron, une trajectoire circulaire de rayon $R = \frac{mv}{qB}$ (q étant leur charge). Le diamètre de la trajectoire (OA) dépend de mv, donc uniquement de $\sqrt{m}$, puisque $\sqrt{2K}$ est constant. La mesure de OA (et OA' pour une autre particule) permet de calculer la masse de la particule.

On peut placer dans la zone AA' une plaque photographique. La position des taches et leur intensité renseignent sur les mesures et l'abondance des particules.

On peut également faire varier $\vec{B}$ de façon à recevoir au même point A des particules de masses différentes (qu'on déduit de la valeur de $\vec{B}$). Dans ce cas, on peut placer en A un dispositif permettant de mesurer la charge apportée par chaque groupe de particules, donc leur abondance.

SPIN ♦ pages 45, 85, 142, 144, 176, 202, 203, 205, 251, 256, 260, 274, 313, 334, 340, 349, 350, 351, 355, 409, 413, 415, 416, 417, 420, 424, 427, 428, 429, 431, 432, 436, 439, 452, 484, 509.

♦ Se reporter à l'article : la physique des hautes énergies, les Particules, page 415.

Grandeur liée à la rotation d'une particule sur elle-même, c'est-à-dire à son moment cinétique. Chacune des particules élémentaires a un spin propre, quantifié comme toutes les grandeurs caractérisant une particule.

Certaines particules ont un spin qui, en unités quantiques, s'exprime par un nombre demi-entier. Ce sont celles qui suivent la statistique de Fermi-Dirac, les fermions. L'électron, dont le spin peut prendre les valeurs $+\frac{1}{2}$ ou $-\frac{1}{2}$, est de ce type.

D'autres ont un spin entier ; ce sont les bosons, suivant la statistique de Bose-Einstein. Les mésons (de spin 0) et les photons (de spin 1) suivent cette statistique.

SPIN ISOTOPIQUE : voir Isospin et la page 356.

STATIQUE (Statics) pages 30, 172, 183, 208, 266, 338, 444, 463.

Branche de la mécanique étudiant les équilibres, c'est-à-dire les systèmes au repos, dont tous les points ont une position invariable par rapport à un repère.

Cela ne peut se produire que si l'ensemble des forces qui s'exercent sur le système est équivalent à zéro.
La statique des fluides est une application de cette loi à chaque élément d'un fluide en équilibre. C'est une des branches les plus anciennes de la physique, puisqu'elle conduit à des théorèmes dont le plus ancien est le « principe » d'Archimède.

STATISTIQUE (Statistics) pages 85, 176, 254, 259, 260, 300, 322, 413, 505, 507, 515.

La statistique intervient en physique pour décrire l'état d'une population de particules, c'est-à-dire essentiellement l'énergie de ces particules et les propriétés qui en découlent.
La statistique classique type est celle de Boltzmann, qui intervient pour étudier les propriétés des gaz parfaits (théorie cinétique) ainsi que les chaleurs massiques. Nous l'appelons classique, car elle ne fait intervenir aucune quantification de l'énergie.
Les statistiques quantiques, au contraire, tiennent compte de ce que les particules ne peuvent avoir que des valeurs quantifiées de l'énergie.
On distingue :
— La statistique de Bose-Einstein ♦ s'appliquant aux particules de spin entier. Dans cette statistique, le nombre de particules sur le même niveau d'énergie est quelconque.
— La statistique de Fermi-Dirac, s'appliquant aux particules de spin demi-entier (électrons, etc.), exige au contraire qu'aucune particule ne soit dans le même état quantique.

♦ Voir Bosons.

STEFAN (loi de) : voir Corps noir page 143 et la page 83.

STRASSMAN (Fritz) pages 263, 275.

Chimiste allemand, né en 1902.
Ancien élève du Kaiser Wilhelm Institüt de Berlin, Strassman en devient directeur du département de chimie en 1946, puis dirige le laboratoire de recherches en chimie nucléaire à l'université de Mayence.

Ouvrages essentiels :
Friedliche Chemie der Atomkerne (Kupferberg, Mainz, 1949).
Über das Zerplatzen des Urankernes, durch langsame Neutronen (W. de Gruyter, Berlin, 1939).

SUBLIMATION (Sublimation)

Passage direct de l'état solide à l'état gazeux. Par exemple, la naphtaline (naphtaline des droguistes) se sublime. Il en est de même de l'iode. Un corps se sublime si la pression est inférieure à celle du point triple. Dans le cas contraire, le corps passera à l'état liquide.

SUPRACONDUCTIVITÉ ♦ (Superconductivity) page 518.

♦ Se reporter à l'article : le Cristal, page 160.

Découverte par Kammerling Onnes (1911), la supraconductivité consiste en une annulation brusque de la résistivité à une température dite critique, généralement

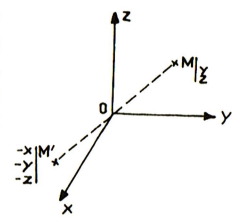
très basse. L'expérience de Kammerling Onnes, faite sur le mercure, s'effectuait à 4,2°K (environ — 269°C). Il résulte de l'absence de résistivité, donc de résistance, qu'un courant lancé dans une boucle supraconductrice peut durer plusieurs jours, en l'absence de tout générateur.
La supraconductivité semble due plus aux ions du réseau cristallin qu'aux électrons et serait produite par les vibrations de ces ions. L'étude théorique peut se faire par l'intermédiaire de phonons et des interactions de ceux-ci avec les électrons.
Les applications de la supraconductivité sont déjà importantes. On peut, grâce à des matériaux supraconducteurs, réaliser des inductions magnétiques de l'ordre de 10 teslas ♦. On envisage la réalisation des mémoires supraconductrices dont il existe déjà un modèle (cryotron).

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

SUSTENTATION : voir Portance

SYMÉTRIE (Symmetry) pages 55, 68, 142, 412, 430, 480, 516.

Changement de toutes les coordonnées spatiales d'un système de particules dans leurs symétriques par rapport à l'origine du repère choisi (figure ci-contre). La notion de symétrie intervient dans la définition de la parité ♦. Si le système a la parité + 1, les fonctions d'onde définissant le système restent inchangées au cours de cette opération. S'il a la parité — 1, les fonctions d'onde changent de signe.



SYNCHROCYCLOTRON (Synchrocyclotron) pages 170, 420.

Accélérateur de particules d'un type dérivé du cyclotron.
Dans un cyclotron, si les particules accélérées atteignent des vitesses suffisamment élevées, l'effet relativiste intervient ♦ : il se traduit par une augmentation apparente de la masse de la particule, selon la relation : $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$,

où m est la masse de la particule animée de la vitesse v, m_0 la masse au repos, et c la vitesse de la lumière. Il en résulte qu'une force appliquée à la particule l'accélère d'autant moins que sa masse est plus grande. Elle mettra, pour effectuer un demi-cercle entre deux impulsions successives, un temps trop long. Le synchronisme prévu par construction entre le temps de parcours d'un demi-cercle et la période de la tension fournissant l'impulsion n'est pas conservé.
Pour remédier à ce défaut, on a utilisé le synchrocyclotron. C'est un cyclotron dont la période de la tension alternative appliquée aux « dees » ♦ peut varier ; elle peut ainsi être synchronisée sur la période de révolution des particules utilisées.

♦ Voir l'article : la physique des hautes énergies, les Particules, pages 430 à 434.

♦ Voir Dynamique.

♦ Voir Cyclotron.

SYNCHROTRON (Synchrotron) pages 22, 88, 98, 250, 420, 503, 530.

C'est un accélérateur circulaire où les particules, contrairement au cyclotron, décrivent un cercle de rayon constant, grâce à la variation simultanée, au cours de l'accélération, du champ magnétique et de la fréquence de la tension accélératrice.
Ce sont les plus puissantes machines réalisées à ce jour : le synchrotron du C.E.R.N. ♦ accélère les protons jusqu'à une énergie de 28 GeV ♦, celui de Berkeley

♦ C.E.R.N. : Conseil européen de la recherche nucléaire.

♦ 1 GeV = 1 milliard d'électrons-volts.

à 30 GeV. Le synchrotron de Serpoukov est prévu pour fournir des protons de 70 GeV.
Il existe également des synchrotrons à électrons, où ceux-ci atteignent rapidement une vitesse de l'ordre de celle de la lumière.

SYNTHÈSE (Synthesis) pages 127 et 128.

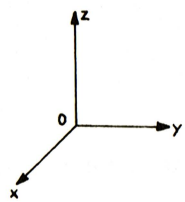
Opération inverse de l'analyse : c'est la réalisation d'un composé chimique à partir de ses constituants. Si la synthèse se fait à partir des éléments, c'est une synthèse directe. Si les moyens sont plus détournés (emploi de corps intermédiaires), c'est une synthèse indirecte.
Outre l'intérêt théorique de la synthèse, contre-épreuve indispensable de l'analyse pour établir une formule chimique, la synthèse est d'un intérêt économique énorme : la production d'antibiotiques de synthèse en est un exemple. On pourrait en citer d'autres, des matières plastiques aux caoutchoucs.
Parfois, la synthèse naît d'un besoin créé par des circonstances particulières : c'est le cas de la synthèse de l'ammoniac et de l'acide nitrique, devant fournir à l'Allemagne, pendant la Première Guerre mondiale, les explosifs dont elle avait besoin. Cette synthèse est pratiquement aujourd'hui la seule source d'acide nitrique. Par contre, l'essence synthétique, produite à grands frais par le IIIe Reich, n'a pas supplanté les dérivés du pétrole naturel.

SYSTÈME (System) pages 118, 123, 126, 198, 218, 252, 253, 263, 265, 267, 271, 277, 308, 312, 327, 337, 342, 348, 354, 410, 412, 413, 445, 448, 486, 493, 496, 497, 508, 510, 514, 515.

Un système physique représente un ensemble de corps matériels dont on étudie les relations avec le milieu extérieur, ce qui revient à partager l'Univers en deux parties : le système et le reste...
Cette méthode a l'avantage de pouvoir donner un signe aux échanges d'énergie avec l'extérieur, ce qui est nécessaire dans les raisonnements thermodynamiques.

Systèmes de coordonnées

Repère formé par trois axes concourants O*x*, O*y*, O*z* qui permettent de repérer la position d'un point par rapport à ces trois axes.



Systèmes galiléens ♦ (ou inertiels)

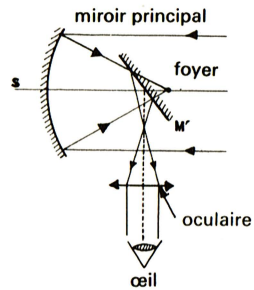
Mention spéciale doit être faite de ces systèmes : ce sont ceux dans lesquels un corps libre en repos, à un instant donné, restera indéfiniment en repos. Tout système en translation uniforme par rapport à un système galiléen est lui-même galiléen. Les lois de la mécanique sont indépendantes du système choisi : c'est le principe de relativité de Galilée.

♦ Pour plus de précisions, voir l'article : Électricité et magnétisme, page 198.

SYSTÈME D'UNITÉS : voir Unités

T

TÉLESCOPE (Telescope) pages 270, 304, 344, 352, 451.



Instrument d'optique destiné à l'observation des astres. Il poursuit donc le même but qu'une lunette astronomique. La différence avec celle-ci est dans l'objectif : alors que, dans une lunette, le faisceau de rayons issus de l'astre observé est concentré au foyer d'une lentille par réfraction, on obtient dans le télescope un résultat analogue par réflexion sur un miroir sphérique concave ou parabolique (dans les grands instruments). On obtient ainsi une image de l'astre beaucoup plus lumineuse que ne l'est l'astre lui-même observé à l'œil nu : en effet, toute la lumière reçue sur le miroir, dont la surface est de plusieurs mètres carrés, se trouve concentrée pratiquement en un point. On peut ainsi déceler des astres parfaitement invisibles à l'observation directe.
Cette « image objective » est soit fixée directement sur la plaque photographique, soit observée par l'œil à l'aide d'un oculaire (qui n'est pas autre chose qu'une forte loupe), après intervention de miroirs permettant à l'observateur de ne pas se trouver dans le champ de l'appareil.
L'avantage des télescopes est d'éviter la dispersion, inévitable avec les systèmes réfracteurs. De plus, on n'a qu'une surface à tailler et les imperfections au sein du verre n'ont aucune influence, ce qui n'est pas sans intérêt.
Le géant de ces appareils est américain : c'est le télescope du mont Palomar, avec un miroir de 5 m de diamètre, dont on a dit qu'il a doublé le rayon de l'univers visible. Le télescope de Saint-Michel-de-Provence fait très bonne figure avec un miroir de 2 m de diamètre.

TÉLÉVISION (Television) pages 205, 229, 235, 264, 268, 277, 325, 343, 344, 359, 463, 524, 539.

Transmission d'images à distance... Pour aboutir à ce résultat, il faut faire correspondre à chaque point de l'objet observé un signal électromagnétique pouvant restituer à la réception :
— la position du point,
— sa luminosité,
— éventuellement sa couleur.

Rôle de la caméra

Dans celle-ci, l'image optique, donnée par un objectif semblable à celui d'une caméra conventionnelle, est reçue sur un écran formé d'une juxtaposition de petits éléments photoémissifs, c'est-à-dire émettant des électrons sous l'action de la lumière par effet photoélectronique. D'autre part, cette surface est balayée suivant 625 lignes horizontales successives, par exemple, par un faisceau d'électrons issu d'un dispositif analogue à un tube cathodique.

fig. 1

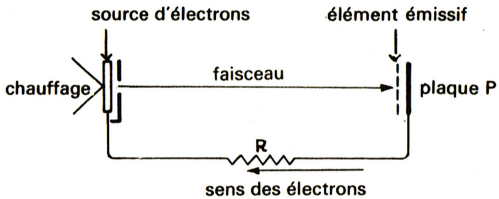
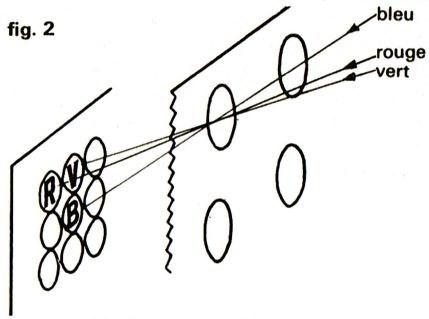


fig. 2



Si l'élément émissif est dans l'obscurité ♦, le flux d'électrons qui le frappe ne subit aucune modification : reçu par une plaque située derrière l'écran émissif, il produit dans un circuit [symbolisé par R (fig. 1)] un courant I (en sens inverse du sens des électrons, puisqu'ils sont négatifs ♦).

Si, au contraire, l'élément est éclairé, il émet des électrons. Dans ces conditions, les places laissées vacantes par ces électrons seront occupées par ceux qui proviennent du faisceau ; ceux-ci n'atteindront donc pas la plaque P qui en captera un moins grand nombre que dans le cas précédent. Le courant I′ passant dans R sera moins intense.

Ce sont ces variations de I qui constituent le signal de luminosité transmis à l'émetteur.

A la réception, nous disposons d'un tube cathodique. Le balayage de ce tube est synchronisé sur celui de la caméra ; ainsi, tout point de l'image reçue par la caméra est assuré de retrouver sa place sur l'image finale. Le signal de luminosité qui a été préalablement amplifié, agit sur l'intensité du faisceau d'électrons assurant le balayage, et l'image se trouve ainsi reconstituée point par point, en $\frac{1}{25}$ seconde, temps suffisant pour percevoir une image continue, grâce à la persistance des impressions lumineuses.

La transmission des couleurs repose sur un principe analogue, appliqué à trois images obtenues au travers de filtres colorés à partir de l'image optique donnée par l'objectif. On explore donc une image bleue, une verte et une rouge, qui donneront donc trois signaux de luminosité pour un même point. A la réception, trois canons à électrons sont nécessaires. Chacun émet un faisceau d'intensité proportionnelle au signal de luminosité de la couleur correspondante.

La difficulté réside dans la structure de l'écran, qui doit porter des pastilles luminescentes (phosphores) rouges, bleues, vertes juxtaposées, et qui ne doivent être excitées que par les faisceaux d'électrons correspondants. On y arrive en plaçant au voisinage de l'écran un masque métallique percé de trous, diaphragmant le faisceau d'électrons et ne permettant au faisceau « rouge » que d'atteindre les « phosphores » rouges.

♦ C'est-à-dire s'il correspond à une zone noire de l'image.

♦ Le courant circule dans le circuit, conventionnellement, du pôle + au pôle — du générateur ; il correspond à un déplacement des électrons dans le sens inverse (puisque les électrons sont chargés négativement).

TEMPÉRATURE (Temperature)

pages 85, 98, 120, 124, 141, 167, 173, 174, 181, 200, 201, 203, 236, 254, 255, 258, 259, 260, 264, 265, 269, 316, 317, 319, 323, 325, 327, 328, 329, 332, 347, 353, 412, 449, 450, 456, 458, 460, 466, 474, 476, 478, 479, 486, 497, 504, 509, 516, 517, 528, 531, 539.

Cette grandeur est d'origine physiologique : c'est elle qui nous fait dire qu'un corps est chaud ou froid.

Mais cette définition ne renseigne guère sur le phénomène « température ». La théorie cinétique des gaz a montré que la température était une conséquence de l'agitation des molécules du gaz et, par conséquent, liée à l'énergie cinétique de ces molécules. Au zéro absolu, les molécules sont parfaitement immobiles, gelées, pourrait-on dire. L'apport de chaleur a pour résultat de les mettre en mouvement, et l'on peut définir une énergie cinétique moyenne des molécules. Cette énergie est proportionnelle à la température du gaz.
La température mesure, en somme, le désordre existant dans un système. Au zéro absolu, la matière est parfaitement ordonnée ; au fur et à mesure que la température augmente, les vibrations des corpuscules autour de leur position d'équilibre viennent perturber cette ordonnance jusqu'à la rompre, au point que le corps n'a plus de forme (état liquide) ou même jusqu'à rendre complètement indépendantes les molécules du corps, qui devient gazeux.

TEMPÉRATURE (échelle de) : voir Thermomètre

TEMPS ♦ (Time) pages 172, 175, 182, 280, 310, 320, 330, 338, 345, 348, 411, 438, 445, 494, 495, 500, 532.

♦ Voir Relativité.

Il serait plus exact de parler, dans cet article, de durée, qui est l'intervalle de temps s'écoulant entre deux événements. C'est plus la durée qui intéresse le physicien que le temps des horloges (pouvant varier, puisqu'on est amené à définir un temps universel : l'heure de Greenwich). La mesure des durées repose sur la constance de l'intervalle de temps séparant deux phénomènes qui peuvent se répéter indéfiniment : phénomène astronomique, oscillations d'un balancier, par exemple, et, version plus moderne, vibration d'atomes à l'intérieur d'une molécule (horloges atomiques). On est ainsi en mesure de découper une durée, exactement comme on découpe une longueur en mètres.

Le temps, mesuré dans un système de référence S où évolue l'observateur, aura-t-il la même valeur dans un autre système S′ ? C'est là tout le problème de la relativité, et la réponse est négative. Si un observateur mesure l'intervalle t séparant deux événements se produisant dans un système S′ en translation à la vitesse v par rapport à lui, ces deux événements sont séparés, dans le système S′, par un temps t' que mesurera un observateur placé dans S′, et t' est inférieur à t. C'est ce paradoxe qu'à développé Langevin en supposant qu'un jumeau, réalisant un long voyage cosmique, se retrouve à son retour plus jeune que son frère. Il n'est pas moins surprenant de constater que la désintégration des muons a confirmé la théorie d'Einstein.

TENSION ÉLECTRIQUE : voir Potentiel et les pages 186, 193, 250, 276, 308, 410, 453, 460, 480, 483, 490, 507, 521, 524, 539.

TENSION SUPERFICIELLE (Surface tension) pages 67, 510.

Phénomènes apparaissant à la surface de séparation de deux fluides (2 liquides ou liquide et gaz) et dus aux forces intermoléculaires tendant à retenir les molécules au sein de leur milieu.
Les conséquences de la tension superficielle sont les phénomènes de capillarité (qui font monter les liquides dans des tubes étroits) et la formation de lames ou de bulles. C'est précisément aussi la tension superficielle qui donne à ces bulles la forme sphérique.

TESLA (Nikola) pages 193, 270, 357, 510.

Inventeur et ingénieur américain, né à Smiljan (Croatie) en 1856, mort à New York en 1943. Tesla commence sa carrière d'inventeur à Budapest, puis émigre aux États-Unis en 1884 où il s'associe à Edison. Cette collaboration ne dure guère et Tesla se consacre alors à des travaux en électricité.
Parmi ses nombreuses découvertes et inventions, citons un système de transmission du courant alternatif ; un générateur de courant à haute fréquence ; des oscillateurs mécaniques ; un système de transmission sans fils... Il doit sa célébrité à un moteur à courant alternatif et à un transformateur, qui tous deux portent son nom.

THÉORIE UNITAIRE (Unified field theory) pages 183, 193, 195, 276.

Il existe quatre types d'interaction, c'est-à-dire quatre causes susceptibles de produire des forces : les interactions de gravitation, électromagnétiques, nucléaires fortes et nucléaires faibles. A chacune de ces interactions correspond un champ. La physique « classique », qui ne connaissait que le champ de gravitation et le champ électromagnétique, les considérait comme indépendants. Einstein, par sa théorie de la relativité générale, a montré que les deux interactions ne sont pas indépendantes : la lumière, résultat de la propagation d'un champ électromagnétique, est déviée par la présence d'une masse comme le Soleil, créant un champ de gravitation. Le problème est dès lors posé : peut-on imaginer une théorie permettant de rendre compte, par une seule équation, de toutes les actions s'exerçant sur un corps, quelle que soit leur origine? Einstein essaya de résoudre ce problème, mais il n'aboutit à aucun résultat satisfaisant. Une autre tentative est due à Heisenberg qui publia, en 1958, une « équation du champ unifié ». Il semble qu'il ait été plus loin qu'Einstein dans cette voie.
Malgré tout, le problème est loin d'être résolu et la théorie unitaire parfaite reste à trouver.

THERMOCHIMIE (Thermochemistry)

Branche de la chimie qui étudie les effets thermiques des réactions chimiques et les lois régissant les échanges de chaleur entre le système chimique et le milieu extérieur. C'est une application à la chimie des lois plus générales de la thermodynamique.

THERMOCOUPLE : voir Thermoélectrique (effet)

THERMODYNAMIQUE (Thermodynamics) pages 37, 83, 88, 92, 93, 119, 122 à 126, 136, 142, 252, 254, 279, 265, 316, 317, 328, 454, 466, 493, 500, 511, 515, 517, 528, 530, 531.

L'énergie peut se présenter sous différentes formes : travail, énergie électrique, etc., et chaleur. La thermodynamique est l'étude des lois des transformations entre la chaleur et les autres formes de l'énergie.

Principes de la thermodynamique

Elle est basée sur deux principes :
— *Le premier principe, ou principe d'équivalence.* Historiquement le second, puisque énoncé en 1842 par Joule, il exprime l'équivalence de la chaleur et du

travail. C'est un principe de conservation, qui n'établit aucune hiérarchie dans les formes d'énergie.

— *Le second principe, ou principe de Carnot* (1828), exprime une hiérarchie entre les formes d'énergie, dont la chaleur est la forme la plus dégradée. Il énonce qu'il est impossible de transformer intégralement en travail une quantité de chaleur : on ne peut espérer récupérer sur l'arbre de transmission d'un moteur toute l'énergie correspondant à la combustion intégrale de l'essence (un rendement de 40 à 50 % est un maximum).

On ajoute à ces principes celui qu'on appelle quelquefois le *troisième principe*. Dû à Nernst ♦ (1906), il exprime que l'entropie d'un système est nulle au zéro absolu. Cela signifie que le système est alors dans son état d'ordre maximal.

♦ Walter Nernst (1864-1941) : physicien allemand, dont les travaux ont surtout porté sur la thermodynamique et ses applications à la chimie. Il a établi en particulier la théorie thermodynamique des piles. Prix Nobel en 1920.

Application et interprétation de ces principes

Elles se font sur des bases statistiques (statistique de Boltzmann pour les gaz parfaits, statistiques quantiques de Bose-Einstein et Fermi-Dirac pour les particules) et permet à la thermodynamique de dépasser singulièrement le cadre étroit des moteurs thermiques, qui était le sien à l'origine. La thermodynamique chimique, par exemple, a fait passer la chimie d'un stade presque entièrement descriptif à celui de l'étude et de la prévision théorique des réactions : on lui doit la théorie des piles (due à Nernst), qui s'applique aussi bien aux piles classiques qu'aux piles à combustible.

C'est dire que ce serait une erreur grave de limiter la thermodynamique à la science des machines à vapeur.

THERMODYNAMIQUES (fonctions) : voir Fonctions d'état

THERMOÉLECTRIQUE (effet) (Thermoelectric effect)

C'est la résultante de deux phénomènes se produisant aux jonctions de deux conducteurs : l'effet Peltier et l'effet Thomson.

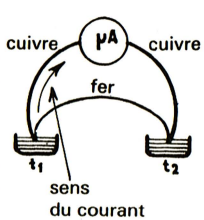
L'effet Peltier ♦

Celui-ci consiste en l'absorption ou la production de chaleur à la jonction de deux métaux différents parcourus par un courant électrique. Réciproquement, l'échauffement d'une jonction (ou son refroidissement) entraîne le passage d'un courant. Cet effet s'explique par la différence de densité électronique, ou nombre d'électrons par unité de volume, dans les deux métaux. Il en résulte qu'il faut fournir de l'énergie pour faire passer les électrons de la densité n_1, dans le premier métal, à la densité n_2, dans le second. C'est tout à fait comparable au passage d'un gaz de la pression p_1 à la pression p_2, qui nécessite également un apport d'énergie : on parle souvent de gaz électronique, dont la « pression » varie donc au passage de la jonction.

♦ Jean-Charles Athanase Peltier, né à Ham (Somme) en 1785, mort à Paris en 1845, fut également le premier à introduire le concept d'induction électrostatique.

L'effet Thomson

Il se produit à la jonction de deux métaux de même nature, mais à des températures différentes. Là encore, il résulte de cette différence de température que le passage d'électrons d'un conducteur à un autre nécessite une dépense d'énergie. Dans un « couple thermoélectrique », ou thermocouple, on utilise deux soudures entre deux métaux différents (fer/cuivre, platine/platine rhodié, etc.). Si les deux soudures sont à des températures égales, le circuit est symétrique. Aucun courant ne circule et le microampèremètre μA ne dévie pas.

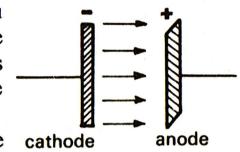


Au contraire, si les températures sont différentes, il apparaît un courant dans le circuit. Ce courant peut être utilisé pour mesurer la température d'une des soudures (si on connaît la température de l'autre : on peut, par exemple, maintenir la soudure « froide » dans la glace).

THERMOÉLECTRONIQUE (effet) (Thermoelectronic effect)

pages 210, 229, 312, 324, 525.

Est encore appelé improprement « effet thermoïonique ». Lorsqu'un métal (ou un oxyde métallique) est chauffé, l'énergie ainsi apportée peut être suffisante pour vaincre l'attraction des électrons par les noyaux atomiques. Des électrons peuvent ainsi être expulsés de la surface du corps chauffé. C'est en cela que consiste l'effet thermoélectronique.



Que deviennent les électrons ? Si le filament chauffé (cathode) est placé dans le vide, et en l'absence de tout champ électrique, les électrons forment un « nuage » au voisinage du métal émetteur (en effet, celui-ci est devenu positif du fait même de la perte d'électrons et attire ceux-ci). On peut considérer que, pendant un certain intervalle de temps, le nombre d'électrons rentrant dans le métal est égal à celui des électrons émis.

En présence d'un champ électrique, les électrons sont soumis à l'action de ce champ. S'il est de sens convenable, créé par une électrode portée à un potentiel positif (anode), il va se produire un courant d'électrons de la cathode à l'anode, donc un courant électrique en sens inverse ♦.

♦ Voir note page 513.

C'est la base de toutes les applications de l'effet thermoélectronique, et elles sont nombreuses. Tous les tubes utilisés en électronique, le canon à électrons qu'on trouve dans le tube cathodique ou les appareils producteurs de rayons X comportent des cathodes chaudes. On a en effet un moyen commode de régler le flux d'électrons en réglant simplement le chauffage de la cathode, le nombre d'électrons émis augmentant en même temps que la température.

Cet effet a été découvert par Edison en 1883 et a été interprété par Richardson en 1900.

THERMOMÈTRE - THERMOMÉTRIE (Thermometer - Thermometry)

pages 255, 270, 315, 479.

La thermométrie est la mesure des températures, et non de la chaleur, comme on l'entend couramment : un apport de chaleur augmente la température d'un corps ou inversement. Il s'agit donc de deux grandeurs liées, mais essentiellement différentes.

L'évaluation des températures est d'origine physiologique, mais cette indication est infidèle et ne s'applique que dans un intervalle de températures très réduit...

L'étape suivante est le repérage, en faisant correspondre à une grandeur physique un nombre arbitraire. Cette méthode objective est utilisée dans le thermomètre à liquide : le volume de mercure qui monte dans le tube dépend de la température, et on repère celle-ci de la façon la plus simple. On affecte 0 au niveau atteint dans la glace fondante, 100 à celui atteint dans l'eau bouillante, et on partage l'intervalle en 100 parties.

Insistons sur le fait que cette graduation est parfaitement arbitraire. Elle est attribuée au Suédois Celsius ♦, mais il en existe d'autres. Citons la graduation Fahrenheit, chère aux Anglo-Saxons, qui attribue 32° et 212° aux points fixes précédents.

♦ A. Celsius (1701-1744) : astronome suédois. Il avait proposé l'échelle 100-0. Un thermomètre portant la graduation 0-100 avait été réalisé à Lyon par Jean-Pierre Christin (1683-1755) dès 1743. Or l'échelle Celsius a été proposée sous sa forme 0-100 en 1750. Il y a donc un problème d'antériorité... (M. Danloux-Dumesnil : *Esprit et bon usage du système métrique*, Librairie Béranger, Paris, 1965).

Échelle des températures

La thermodynamique a permis de réduire l'arbitraire. L'échelle part de la température la plus basse théoriquement possible, à laquelle on donne la valeur zéro (zéro absolu = — 273,15° C). On prend un seul point fixe : la température d'équilibre entre glace, eau et vapeur d'eau, appelé point triple de l'eau et correspondant à 0,01° C. On lui affecte la température « thermodynamique » 273,16. Le degré Kelvin ou, mieux, le kelvin ainsi défini a même longueur ♦ que le degré Celsius. Il en résulte la règle pratique : la température thermodynamique ou absolue se déduit de la température Celsius par addition de 273,15 :

$$T = t + 273{,}15.$$

♦ La différence entre deux températures s'exprime par le même nombre en degrés Celsius et Kelvin.

Différents types de thermomètres

Les thermomètres à liquide ne peuvent être utilisés que dans un domaine de l'ordre de — 200° C à + 300° C. Aux plus hautes températures, il faut faire appel à d'autres phénomènes thermométriques : on utilisera des thermomètres à résistance de platine, utilisant le fait qu'un conducteur a une résistance variable avec la température. On emploie également des couples thermoélectriques. Aux très hautes températures, il faut renoncer à un contact entre thermomètre et corps étudié : on est réduit à observer le rayonnement émis par celui-ci et à en déduire sa température. Ce sont ces « pyromètres » à rayonnement qui permettent de contrôler, dans l'industrie, la température d'une masse de métal incandescent.

Aux très basses températures, le thermomètre à résistance rend également des services (jusqu'à l'apparition de la supraconductivité). Au-delà, on en est réduit à des estimations basées sur des calculs de thermodynamique.

THOMSON (sir Joseph John) pages 31, 33, 83, 87, 136, 171, 182, 197, 205, 273, 320, 499, 508.

Physicien anglais, né à Cheetham Hill (près de Manchester) en 1856, mort à Cambridge en 1940.

Élève de Maxwell à Cambridge, J. J. Thomson est par la suite nommé professeur et directeur du laboratoire Cavendish. Président de la Royal Society, professeur à l'Institut royal de Londres, il reçoit le prix Nobel de physique en 1906.

L'œuvre de J. J. Thomson est particulièrement remarquable sur deux plans : en tant que directeur du laboratoire Cavendish, il fait de cet institut une remarquable école de physique expérimentale, groupant autour de lui des jeunes chercheurs du monde entier. En tant que savant, il se révèle un expérimentateur et un théoricien de premier ordre. S'il s'intéresse à tous les problèmes de la physique, il consacre la plupart de ses recherches à l'exploration des propriétés électriques de la matière.

En 1881, il pose les bases de la théorie électronique en démontrant que l'électricité possède les propriétés fondamentales de la matière, l'inertie et la masse. En 1894, il mesure la vitesse du rayonnement cathodique. Il met alors en évidence les particules qui constituent les rayons cathodiques, les électrons, au cours d'une expérience célèbre où il détermine le quotient de la charge par la masse (e/m) de l'électron (1897).

Au cours de ses recherches, il invente le spectrographe de masse, qui lui permet de peser les atomes et de déceler des ions complexes et des ions négatifs. Ce dispositif aidera Aston et d'autres à mettre en évidence les isotopes.

Enfin, il imagine un modèle d'atome où les électrons sont incorporés dans un noyau positif, idée qui sera reprise et modifiée par Rutherford.

Ouvrages essentiels :
Les Décharges électriques dans les gaz (Gauthier-Villars, Paris, 1900) ;
Passage de l'électricité à travers les gaz (Gauthier-Villars, Paris, 1912) ;
La Théorie atomique (Gauthier-Villars, Paris, 1919) ;
Électricité et matière (Gauthier-Villars, Paris, 1922) ;
Les Rayons d'électricité positive et leur application aux analyses chimiques (Hermann, Paris, 1923) ;
L'Électron en chimie (Blanchard, Paris, 1926) ;
Elements of the mathematical theory of electricity and magnetism (University Press, Cambridge, 1895) ;
The Structure of Light (University Press, Cambridge, 1925) ;
Recollections and reflections (Bell & Sons, Londres, 1936).

THOMSON (sir William) : voir Kelvin

THORIUM (Thorium) pages 68, 257, 275, 499

Élément radioactif de numéro atomique Z = 90 et de masse atomique 232 ♦. Connu depuis 1828 (Berzélius) le thorium est un métal blanc, noircissant à l'air par oxydation. Sa radioactivité a été reconnue par Marie Curie en 1890.

♦ Voir le tableau périodique de Mendéléïev, pages 42 et 43.

C'est un émetteur alpha ♦ de période 13,9 milliards d'années et le premier élément d'une famille radioactive dont l'ultime produit est l'isotope 208 du plomb.

♦ Voir l'article : l'Atome, page 49, et Radioactivité.

Bien que plus abondant que l'uranium, il n'est guère utilisé dans les réacteurs comme combustible, car ses réactions de fission sont plus rares que celles de l'uranium 235. On l'utilise plutôt comme matériau « fertile », c'est-à-dire donnant, après une suite de réactions nucléaires, un élément fissile, qui est ici l'uranium 233.
La suite des réactions est la suivante :

$$^{232}_{90}\mathrm{Th} + {}^{1}_{0}n \longrightarrow \underset{\text{thorium 233}}{^{233}_{90}\mathrm{Th}}$$

$$^{233}_{90}\mathrm{Th} \longrightarrow \underset{\text{protoactinium}}{^{233}_{91}\mathrm{Pa}} + \underset{\text{électron}}{^{0}_{-1}e} + \underset{\text{neutrino}}{\nu}$$

$$^{233}_{91}\mathrm{Pa} \longrightarrow \underset{\text{uranium 233}}{^{233}_{92}\mathrm{U}} + {}^{0}_{-1}e + \nu$$

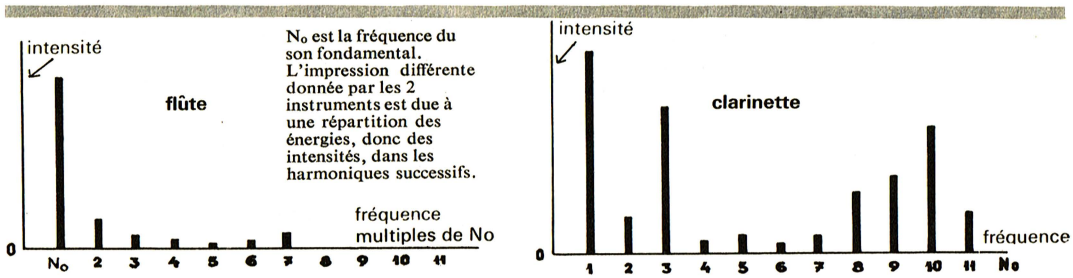
TIMBRE (Timbre)

Les sons que reçoit l'oreille sont différemment perçus par elle, suivant leur hauteur, leur intensité et leur timbre. A ces trois « qualités physiologiques », le physicien fait correspondre des grandeurs physiques.
A la hauteur correspond la fréquence : plus un son est haut, plus sa fréquence est élevée.
A l'intensité correspond l'énergie vibratoire reçue par l'oreille ; l'intensité est donc proportionnelle au carré de l'amplitude ♦. Reste à savoir pourquoi le « la » du piano est différent du même « la » donné par une clarinette ou un trombone, pourquoi la voix de chaque personne est très reconnaissable.

♦ Voir Vibration.

Le son produit par le larynx ou par un instrument de musique n'est pas en général un son pur ♦, c'est-à-dire une vibration sinusoïdale de fréquence et d'amplitude bien définies. C'est au contraire une superposition de vibrations de fréquences et d'amplitudes différentes, et c'est le résultat de cette superposition qui impressionne

♦ Voir ce mot.



l'oreille. Un tuyau d'orgue émettant le do_3 (fréquence $N_0 = 256$ hertz) émet en réalité non seulement le son de fréquence N_0 (fondamental), mais en même temps les sons de fréquence $2\ N_0$, $3\ N_0$, $4\ N_0$, $5\ N_0$, etc., qu'on appelle les harmoniques du son fondamental, et c'est l'amplitude — donc l'intensité — des différents harmoniques qui donne à chaque instrument son timbre particulier ♦.

♦ Voir Spectre sonore.

TRACEUR (Tracer) page 313.

Élément radioactif incorporé à un aliment, un engrais ou un médicament pour en suivre l'absorption et la fixation, et d'une façon générale ce que les biologistes appellent le métabolisme.

C'est ainsi que l'iode radioactif est utilisé pour contrôler le fonctionnement de la thyroïde.

On peut également utiliser des traceurs non radioactifs (oxygène 18) dont on détecte la présence par un spectrographe de masse.

TRAINÉE (Drag) pages 24, 138.

Composante des forces aérodynamiques, conséquences du mouvement d'un corps dans l'air, produisant une résistance à l'avancement. La traînée aérodynamique dépend de plusieurs facteurs :

— *La surface du corps* ou, plus précisément, le maître couple. Le maître couple d'une voiture est la surface de la silhouette de la voiture vue de face, c'est-à-dire dans la direction du mouvement.

— *La masse volumique de l'air* : un air raréfié offre moins de résistance.

— *La forme* : à maître couple égal, une « caisse à savon » offre plus de résistance qu'une forme en goutte d'eau, dite aérodynamique... Chaque forme est caractérisée par un coefficient C_x.

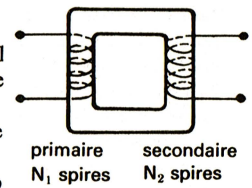
— *La vitesse* : la résistance croît avec son carré : une voiture roulant à 60 km/h offre une résistance 4 fois plus faible qu'à 120 km/h.

Cela est résumé dans la formule : $T = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_x$, où ρ est la masse volumique, v la vitesse, S le maître couple et C_x le coefficient de la forme.

Cela s'applique également aux avions, où la portance s'accompagne immanquablement d'une traînée que le moteur doit vaincre. Notons que, dans ce cas, la formule est la même, mais S représente la surface de l'aile (et non le maître couple) et C_x varie suivant l'inclinaison de cette aile.

TRANSDUCTEUR (Transducer) pages 213, 215, 222, 227, 240, 342.

TRANSFORMATEUR (Transformer) pages 192, 257, 267, 307, 309, 515.



Appareil permettant de modifier les caractéristiques d'un courant alternatif. Il se compose de deux enroulements (primaire et secondaire) bobinés autour d'une carcasse magnétique.

Le passage d'un courant alternatif dans le primaire crée un champ magnétique également alternatif, proportionnel au nombre de spires N_1 du primaire.

Si on considère chacune des spires du secondaire, elle est soumise à ce champ variable, donc à un flux magnétique variable. Les lois de l'induction montrent qu'elle va être le siège d'une force électromotrice d'induction, alternative, de même fréquence que celle du primaire.

Il en sera de même pour toutes les spires. La force électromotrice aux bornes du secondaire est donc proportionnelle au nombre de spires N_2. Pratiquement, il est utile de savoir que dans un transformateur à vide (c'est-à-dire ne débitant au secondaire qu'une intensité nulle ou très faible) les tensions V_1 au primaire et V_2 au secondaire sont liées par :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_2}{N_1}.$$

Les intensités sont liées par la relation très approximative :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

L'intérêt du transformateur vient de ce que, en jouant sur les nombres de spires N_1 et N_2, on peut transformer la tension du primaire en une tension plus basse ou plus élevée, pratiquement sans pertes d'énergie. C'est un des gros avantages du courant alternatif de permettre cette transformation, impossible à réaliser en courant continu.

TRANSISTOR ♦ (Transistor) pages 135, 159, 229, 239, 240, 242, 243, 316, 502, 503, 524.

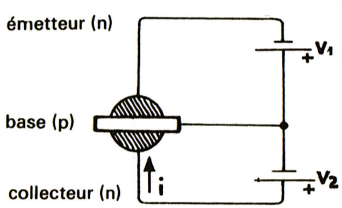
♦ Pour bien comprendre cet article, se reporter à : l'Électronique, pages 237 à 239.

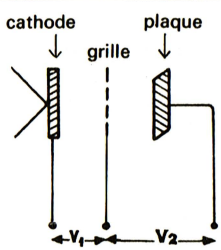
Association de semi-conducteurs comprenant :

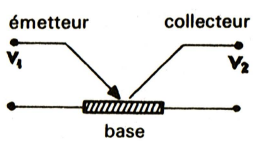
— une zone de type *n* (émetteur),
— une zone de type *p* (base) extrêmement mince (50 microns),
— une zone de type *n* (collecteur),
— ou inversement (*p-n-p*).

Une tension de sens convenable permet aux électrons de l'émetteur dopé ♦ négativement de passer sur la base (c'est l'effet classique d'une diode semi-conductrice). Il faut pour cela que la base soit positive par rapport à l'émetteur. Supposons qu'on applique au collecteur une tension supérieure à celle de la base, la jonction base-collecteur est « bloquée » puisque la zone *n*, positive, ne cède pas d'électrons à la base.

♦ Voir l'article : l'Électronique, page 237.







Mais si la base est très mince, la majeure partie des électrons issus de l'émetteur traverse la base sur la vitesse acquise et se retrouve dans le collecteur, comme une voiture franchissant un feu rouge par excès de vitesse.
On peut donc obtenir un courant dans le circuit du collecteur. Mais l'intérêt du transistor est de pouvoir commander ce courant par variation de la tension V_1 entre émetteur et base : une petite variation de V_1 produit une variation proportionnelle du courant I. Le transistor joue donc le rôle d'amplificateur.
On remarque l'analogie avec la triode ♦ :
— la base joue le rôle de grille,
— l'émetteur est l'équivalent de la cathode émissive,
— le collecteur est l'équivalent de la plaque.
L'intérêt du transistor est d'être très économique : pas de cathode à chauffer. De plus, les tensions de fonctionnement sont plus faibles que pour un tube à vide. Pour finir, l'encombrement d'un transistor est très faible et sa fragilité très réduite. C'est pourquoi l'électronique l'a adopté et utilisé rapidement, avant même que la théorie en soit tout à fait au point. Le transistor, inventé en 1949 par Shockley ♦, Bardeen et Brattain a valu à ses auteurs un prix Nobel que personne n'a contesté.

♦ Voir l'Électronique, pages 232 et 233.

♦ William Bradford Shockley (né en 1910) : physicien américain d'origine anglaise. Ses études sur les semi-conducteurs menées pour le compte de la Compagnie Bell l'ont amené à mettre au point le transistor. Il a reçu le prix Nobel avec ses collaborateurs en 1956.

TRANSITION ♦ (Transition) pages 113, 204, 250 à 252, 264, 528.

Passage d'un électron d'un niveau d'énergie à un autre avec absorption ou émission de l'énergie correspondant à la différence entre les deux niveaux.

TRANSMUTATION (Transmutation) pages 58, 60, 259, 499, 530.

♦ Se reporter à Éléments de transition et à l'article : l'Atome, pages 37 à 39.

Transformation d'un noyau, par radioactivité ou autre réaction nucléaire, affectant le numéro atomique de ce noyau. Il résulte de cette opération un élément différent de l'élément de départ. Le passage du protoactinium 233 à l'uranium 233 est de ce type :

$$^{233}_{91}\mathrm{Pa} \longrightarrow {}^{233}_{92}\mathrm{U} + \underset{\text{électron}}{{}^{0}_{-1}e} + \underset{\text{neutrino}}{\nu}$$

TRANSURANIENS (Transuranium elements) pages 68, 354, 488.

Éléments situés dans la classification périodique au-delà du numéro 92 (l'uranium) ♦, d'où leur nom. Ces éléments n'existent pas dans la nature du fait de leur instabilité. On les obtient dans des réactions nucléaires, par capture de neutrons ou de particules alpha par des noyaux lourds.

♦ Voir le tableau périodique de Mendéléïev, pages 42 et 43.

On connaît les transuraniens suivants :

neptunium	(Np),	Z = 93	californium	(Cf),	Z = 98
plutonium	(Pu),	Z = 94	europium	(Eu),	Z = 99
américium	(Am),	Z = 95	fermium	(Fm),	Z = 100
curium	(Cm)	Z = 96	mendélévium	(Md),	Z = 101
berkelium	(Bk),	Z = 97	nobélium	(No),	Z = 102
			lawrencium	(Lw),	Z = 103

Il faudrait y ajouter l'élément 104 que les Russes de Doubna appellent kourtchatovium. Sa vie moyenne est 1 seconde. Actuellement, on cherche à produire des transuraniens lourds, car on espère trouver une zone de stabilité ♦ aux environs du

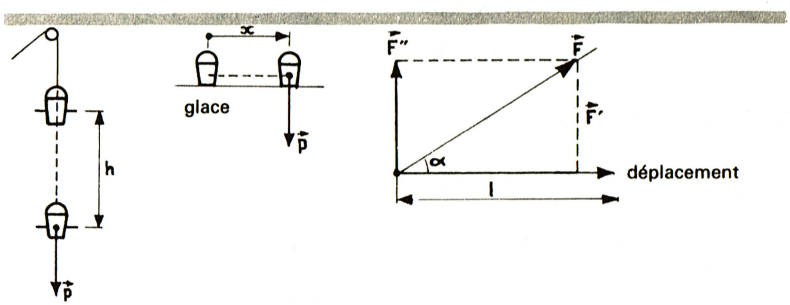
♦ Voir l'article : l'Atome, page 47.

nombre magique 126. C'est-à-dire qu'à partir de Z = 110, ce qui correspondrait à un métal de la colonne du platine dans la classification, on peut s'attendre à obtenir des noyaux stables ou de longue période.

TRAVAIL (Work) pages 88, 92, 93, 124, 187, 192, 252, 253, 265, 316, 495, 515, 525.

Forme d'énergie s'identifiant à l'énergie mécanique. La notion de travail correspond au résultat d'un effort. Le langage courant confond souvent d'ailleurs ces deux notions : effort et travail. Pour le physicien, le travail est produit lorsqu'une force (c'est-à-dire un effort) déplace son point d'application.
Ainsi, un ouvrier montant un seau de béton d'un poids P = 15 kilogrammes-poids à une hauteur h = 3 m fournit un certain travail W = Ph. S'il en monte deux, on dira naturellement que le travail est double. Il en est de même s'il monte un seau à une hauteur double...
On voit apparaître deux facteurs essentiels : intensité de la force et longueur du déplacement. Il y a un troisième facteur : pour effectuer le travail envisagé, l'ouvrier a monté verticalement son seau, dont le poids est également vertical. S'il avait posé son seau sur une mare glacée, parfaitement glissante, le déplacement horizontal du seau ne lui aurait demandé aucun travail. On voit ainsi apparaître l'angle de la force et du déplacement.
C'est pourquoi on exprime le travail d'une force F qui se déplace d'une longueur l par le produit : $W = F\, l \cos \alpha$, où $\cos \alpha$ est le cosinus de l'angle de $\vec{F}$ et de la direction du déplacement.

Si on préfère, on peut décomposer $\vec{F}$ en F′ parallèle au déplacement et F″ perpendiculaire à celui-ci. La force F″ ne travaille pas. Le travail de F est donc le travail de F′, qui est sa projection sur la direction du déplacement.



travail W = P h

Unité de travail ♦

Elle découle de l'unité de force et de l'unité de longueur : c'est le travail de 1 newton qui se déplace de 1 m dans la direction de la force. Cette unité est le joule (J) : 1 J = 1 N × m.
On utilise parfois le kilogrammètre (kgm) correspondant au travail de 1 kilogramme-poids (soit 9,81 newton) sur un déplacement de 1 m. Donc : 1 kgm = 9,81 J.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

TRIODE : voir Tube électronique et les pages 229, 232 et 233, 234, 239, 522.

T.S.F. page 359.

Abréviation de téléphonie sans fil ou télégraphie.
Ce sigle déjà désuet désignait la transmission d'information ♦ (ce mot étant pris au sens très large) par ondes hertziennes. Il s'agit de faire véhiculer un signal par une onde porteuse, d'un émetteur aux récepteurs parfois très éloignés.
L'émission se fait en envoyant la porteuse, modulée par le signal, dans une antenne qui rayonne sous forme d'énergie électromagnétique l'énergie qui lui est transmise.
A la réception, l'onde électromagnétique, reçue sur l'antenne, y produit des variations de tension qui, convenablement amplifiées, sont « détectées », c'est-à-dire qu'on sépare le signal et la porteuse à haute fréquence. Puis ce signal, à nouveau simplifié, est envoyé au haut-parleur.

♦ Se reporter à l'article : l'Électronique, pages 214 et suivantes.

TUBE CATHODIQUE ♦ (Cathode tube) pages 91, 196, 318, 410, 512, 513, 539.

♦ Se reporter à Oscillographe cathodique, Télévision, et à l'article : l'Électronique, page 229.

Pièce maîtresse de l'oscillographe cathodique et du récepteur de télévision.
Le tube cathodique, où règne un vide poussé, comprend essentiellement un canon à électrons, émettant un pinceau d'électrons provoquant la fluorescence de l'écran placé au fond du tube.
Des plaques de déviation permettent, par action d'un champ électrique, de dévier le faisceau d'électrons. Par action d'un champ horizontal variable assurant le balayage et d'un champ vertical proportionnel au signal électrique qu'on veut étudier, on a le moyen d'obtenir une courbe représentant les variations du signal en fonction du temps. C'est ce qui est réalisé dans l'oscillographe.

TUBE DE COOLIDGE : voir Rayons X

TUBE DE CROOKES : voir Crookes (tube de)

TUBE ÉLECTRONIQUE ♦ (Electronic tube) pages 95, 229, 233 à 235, 238, 321, 410, 420, 517, 522.

♦ Pour plus de précisions, se reporter à l'article : l'Électronique, pages 229 à 240.

Composant classique des montages électroniques, malgré la concurrence croissante des transistors. Tous les tubes électroniques dérivent plus ou moins étroitement de la triode :
Dans une ampoule où est réalisé un vide poussé (la pression est de l'ordre du cent-millionième de la pression atmosphérique), une cathode C, entourant un filament métallique FF′, est chauffée par un courant électrique le parcourant.

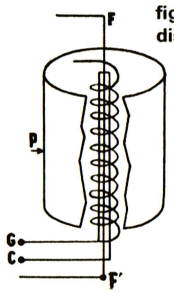


fig. 1
disposition des éléments

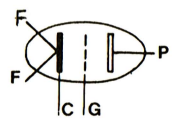


fig. 2 schéma

C = cathode
F,F′ : filament métallique
G : grille
P : plaque cylindrique

Dans ces conditions, la cathode émet des électrons (effet thermoélectronique).
Autour de la cathode, on trouve :
— une « grille » cylindrique G, axée sur la cathode ;
— une plaque cylindrique P, axée, elle aussi, sur la cathode et enveloppant le tout (fig. 1).
Dans les schémas, cela est représenté de façon conventionnelle (fig. 2).
La plaque P est maintenue positive par rapport à la cathode, ce qui lui permet de capter les électrons (négatifs) émis par celle-ci.
La grille G, située entre cathode et plaque, joue le rôle d'un robinet à électrons. Si elle est suffisamment négative par rapport à C, elle repousse les électrons émis, et la plaque ne reçoit rien. Le robinet est fermé.
Lorsqu'elle devient positive, elle attire les électrons qui pourront ainsi parvenir à la plaque.
On conçoit qu'en faisant varier faiblement la tension existant entre la cathode et la grille, c'est-à-dire en rendant la grille plus ou moins positive par rapport à C, on puisse commander le courant circulant entre cathode et plaque. On peut ainsi envisager d'appliquer une tension variable à G et d'obtenir entre C et P un courant dont l'intensité suit les variations de tension. On réalise ainsi une amplification.
La triode peut aussi servir à entretenir des oscillations électriques dans un circuit (fonction oscillatrice) ou de redresser un courant tout en l'amplifiant (fonction détectrice).
Les tubes électroniques se sont compliqués par l'adjonction de grilles permettant d'améliorer les performances, mais le principe reste le même.

TUBE DE TÉLÉVISION : voir Télévision

TUNNEL (effet) ♦ (Tunnel effect) pages 51, 78.

♦ Se reporter à l'article : l'Atome, page 51.

Passage d'un électron d'un atome à l'autre, suivant un mécanisme qui ne peut être interprété qu'en termes de mécanique ondulatoire : un électron lié à un atome est supposé retenu au voisinage de cet atome par une « barrière de potentiel », infranchissable, en physique classique, pour un électron qui n'a pas acquis l'énergie suffisante.
La mécanique ondulatoire, au contraire, considère que la probabilité pour un électron de franchir cette barrière n'est pas complètement nulle, même s'il n'a pas l'énergie suffisante. Il traverse la barrière « dans un tunnel ».
L'expérience confirme cette hypothèse. Il existe des « diodes » à effet tunnel mises au point par le Japonais Esaki.
La radioactivité en est un autre exemple : c'est par effet tunnel qu'un nucléon arrive à vaincre les forces d'interaction nucléaire et sortir du noyau, ce qui est impensable en termes de physique classique.

TURBINE (Turbine) page 526.

Machine dans laquelle l'énergie d'un fluide est employée à fournir du travail. Turbine à gaz ou turbine à vapeur, le principe est de communiquer au fluide (air ou vapeur d'eau) de l'énergie sous forme de chaleur, ce qui augmente sa pression. Cette pression lui permet d'agir sur des aubages ♦ mobiles qui sont ainsi mis en rotation et fournissent du travail.

♦ Aubage : sorte de palette fixée à une roue et soumis au jet de vapeur ou d'eau (c'est le cas d'une roue de moulin).

La turbine est la forme la plus achevée des moteurs thermiques, car elle fournit

directement un mouvement de rotation, ce qui n'est le cas ni de la machine à vapeur alternative ni du moteur à pistons.

TURBOCOMPRESSEUR (Turbo-compressor)

C'est le dispositif précédent fonctionnant en sens inverse, en quelque sorte. Il permet d'augmenter la pression d'un gaz en l'entraînant dans la rotation des aubages ♦ de la turbine.

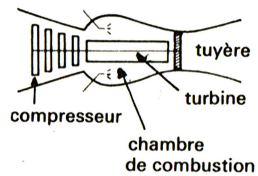
♦ Voir note page précédente.

TURBOPROPULSEUR (Turbo-propeller)

C'est un autre type de propulseur aéronautique. Il diffère du turboréacteur par le fait que le compresseur est moins important, et la turbine a pour rôle principal d'entraîner une hélice, comme dans un moteur à pistons.

TURBORÉACTEUR (Turbo-reactor) page 526.

Type de propulseur aéronautique à turbine.
Il comprend un compresseur à turbine, aspirant de l'air à grande vitesse et le comprimant. Au cours de cette opération, l'air ralentit avant d'être envoyé dans les chambres de combustion, où il est échauffé par la combustion de pétrole. Il a ainsi acquis de l'énergie, qui va être utilisée à faire tourner la turbine entraînant le compresseur et à éjecter les gaz par la tuyère à une grande vitesse, ce qui correspond, par réaction, à une poussée vers l'avant de l'appareil.



TUYAUX SONORES (Sounding pipes)

Tubes dans lesquels l'air est mis en vibration par une embouchure. La colonne d'air du tube entre en résonance et renforce particulièrement certaines fréquences. Il en résulte un son musical, composé de vibrations de fréquences multiples ♦ d'une même valeur qu'on appelle son fondamental. Pour un tuyau d'orgue (à embouchure « de flûte »), cette fréquence est $N = \frac{V}{2l}$, si le tuyau est ouvert à l'extrémité opposée à l'embouchure. Si cette extrémité est fermée, la fréquence fondamentale est $N = \frac{V}{4l}$, où l est la longueur du tuyau et V la vitesse du son dans l'air du tuyau.

♦ Voir Timbre.

U à Z

ULTRASONS (Ultrasonics) pages 320, 486.

Sons de fréquence supérieure à la limite d'audibilité (qui est d'ailleurs variable avec les individus). On considère arbitrairement comme ultrasons les vibrations de fréquence supérieure à 16 000 hertz ♦.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

Leur production se fait par des moyens assez peu différents de ceux qui provoquent des sons audibles : oscillateur électrique relié à un haut-parleur ou à un dispositif piézo-électrique convertissant les variations périodiques de tension en vibrations mécaniques d'une lame de quartz.

Les ultrasons ont permis de réaliser des sondeurs sous-marins (écho-sondeurs) : un faisceau d'ultrasons émis verticalement vers le fond se réfléchit, et on détecte l'onde réfléchie. C'est en somme l'analogue du radar ; comme dans celui-ci, le temps de parcours de l'onde sonore permet de mesurer la profondeur.

ULTRAVIOLET (Ultraviolet) pages 208, 235, 264, 331, 363, 487, 507.

Lumière invisible, car elle est de longueur d'onde inférieure à 0,4 micron ♦ (cette valeur correspond au violet extrême). Les « rayons » ultraviolets sont très énergétiques, car de faible longueur d'onde : ils produisent un effet photoélectrique intense, ainsi que la fluorescence de beaucoup de substances. (Cet effet est utilisé pour des jeux de « lumière noire » dans certains spectacles.)

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 14.

Le verre absorbant les ultraviolets, on utilise pour leur étude des optiques ♦ de quartz et même de sel gemme. Il n'est pas question de les détecter directement à l'œil nu : la plaque photographique est alors nécessaire.

♦ Optiques ou prismes, lentilles, etc.

Les rayons ultraviolets sont produits en abondance dans l'arc électrique, particulièrement entre des électrodes de fer. La lampe à vapeur de mercure à enveloppe de quartz est utilisée dans les laboratoires. Les tubes fluorescents utilisés pour l'éclairage produisent des rayons ultraviolets (car ils n'ont de néon que le nom, ou presque : la décharge électrique se produit dans de la vapeur de mercure, et c'est la raison pour laquelle on obtient des rayons ultraviolets). C'est l'enveloppe du tube, recouverte intérieurement d'une substance fluorescente, qui produit l'éclairage.

S'ils sont invisibles, les rayons ultraviolets n'en sont pas moins dangereux pour la rétine. On doit s'en protéger lors d'opérations telles que la soudure à l'arc, ainsi qu'en haute montagne.

UNITÉS (Units) pages 187, 188, 250, 266, 270, 271, 274, 277, 316, 338, 357, 444, 446, 450, 451, 455, 484, 495, 523, 534, 535.

Pour mesurer une longueur, on la compare à une autre, prise arbitrairement comme unité. Notre unité, le mètre, n'échappe pas à cet arbitraire. L'essentiel est de retenir que toute mesure repose sur une comparaison de ce genre.

Systèmes d'unités incohérent et cohérent

L'unité de longueur étant fixée, on peut choisir, tout aussi arbitrairement, l'unité de surface : par exemple, celle d'un cercle de 3 m de rayon. Résultat : lorsqu'on mesurera en mètres la longueur l et la largeur l' d'un champ rectangulaire, sa surface sera donnée par la formule ♦ : $S = \frac{1}{9\pi} ll'$.

♦ 9π m² : surface de ce cercle de 3 m de rayon.

Si l'on choisit indépendamment les unités de chaque grandeur, cela nous conduit à des calculs inutiles et un tel système d'unités est dit incohérent. A l'opposé, un système cohérent d'unités est basé sur le choix arbitraire d'un petit nombre d'unités, dites fondamentales, à partir desquelles on définit systématiquement les autres unités, dites unités dérivées, de la façon suivante :

a) on choisit une formule de définition : par exemple, une surface S est proportionnelle à deux longueurs : $S = k\, ll'$, où k est une constante.

b) on prend $k = 1$ autant que possible dans la formule choisie. Ainsi, la surface d'un rectangle s'exprime simplement, en m², par le produit de la longueur par la largeur $\left(\text{avec le système incohérent de l'exemple précédent intervenait un coefficient } k = \frac{1}{9\pi}\right)$.

Le choix des unités fondamentales est guidé par le sens pratique : elles doivent être telles que l'étalon qui les représente puisse être réalisé avec la plus grande précision.

Système international (S.I.)

Le système métrique est un bon exemple de système cohérent. C'est sous la forme d'un système à 6 unités fondamentales qu'il est reconnu comme système international (S.I.).

Voyons d'abord comment sont définies les unités fondamentales de ce système.

Trois unités fondamentales de longueur, de masse et de durée serviront de base aux autres unités mécaniques.

— *Le mètre*: *unité de longueur*. Primitivement défini comme la dix millionième partie du quart du méridien terrestre (célèbres mesures de Delambre ♦ et Méchain en 1795), le mètre est depuis 1960 : « la longueur égale à 1 650 763,73 longueurs d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ ♦ de l'atome de krypton 86. »

♦ Jean-Baptiste-Joseph Delambre, né en 1749 à Amiens, mort à Paris en 1822. Auteur de *Tables du Soleil, de Jupiter, de Saturne et des satellites de Jupiter* (1792), *Base du système métrique* (3 vol., 1806-1810).

— *L'unité de masse est le kilogramme*. Primitivement masse du dm³ d'eau pure à 4 °C, le kilogramme est la masse du cylindre de platine iridié de 39 mm de longueur et 39 mm de diamètre déposé au B.I.P.M. ♦, pavillon de Breteuil à Sèvres.

♦ Voir l'article : l'Atome, pages 39 à 41, et Éléments de transition.

— *L'unité de durée est la seconde*. Après avoir été définie par des observations astronomiques, la seconde est définie depuis 1967 comme « la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 ».

♦ Bureau international des poids et mesures.

A ces 3 unités s'ajoutent :

— *L'ampère* : unité d'intensité électrique ;

— *Le kelvin*, unité de température, fraction $\frac{1}{273{,}16}$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau ;

— *La candela*, unité d'intensité lumineuse, servant de base aux autres unités

photométriques. C'est l'intensité rayonnée par $\frac{1}{60}$ cm² de « corps noir » à la température de fusion du platine (1 763 °C).
A partir de ces unités, on bâtit un système d'unités dérivées.

UNITÉS (Tableau des) : voir pages 13 à 16

URANIUM (U)♦ (Uranium) pages 48, 61 à 63, 66, 68, 69, 71, 73, 74, 82, 84, 96, 138, 142, 167, 254, 257, 259, 263, 269, 275, 314, 324, 337, 354, 359, 474, 478, 488, 491, 492, 499, 501, 503, 519, 522.

♦ Se reporter à l'article : l'Atome, pages 47 et suivantes.

Élément de numéro atomique Z = 92, dont la radioactivité fut étudiée par Becquerel en 1896.
C'est un métal de densité 18,7 (1 dm³ a une masse de 18,7 kg) qui fond à 1 133 °C.
A l'état naturel, il comporte trois isotopes, tous radioactifs :
— l'uranium 238 : $^{238}_{92}U$, de période 4,5 milliards d'années : 99,28 % ;
— l'uranium 235 : $^{235}_{92}U$, de période 713 millions d'années : 0,715 % ;
— l'uranium 233 : $^{233}_{92}U$, de période 248 000 d'années : 0,005 %.
Les deux plus importants sont :
— l'uranium 235 qui subit à peu près seul la fission. On doit donc le séparer des autres isotopes;
— l'uranium 238, qui, traité par un flux de neutrons, se transforme en plutonium 239, qui est fissile. C'est ce qui se produit dans les réacteurs « plutomigènes ». Rappelons que l'uranium 233 est un isotope artificiel important ; obtenu à partir du thorium, il subit la fission et peut être utilisé dans un réacteur.
L'uranium est le dernier des éléments naturels.

VALENCE (Valence) pages 236, 258, 318, 320, 445, 502, 529.

La notion de valence a une origine expérimentale : c'était le nombre d'atomes d'hydrogène que pouvait fixer un atome de l'élément considéré : ainsi, l'oxygène (O) fixe 2 atomes d'hydrogène (H) pour former une molécule d'eau (H_2O). Il a donc la valence 2. Le carbone (C) qui donne avec l'hydrogène le méthane, de formule CH_4, a la valence 4.
Malgré quelques perfectionnements, tels que la valence par rapport à l'oxygène ou par rapport au chlore, cette notion resta empirique jusqu'à l'établissement d'une théorie électronique de la liaison chimique par Kossel et Lewis en 1916, théorie qui a permis de résoudre tous les problèmes, y compris les valences multiples présentées par certains éléments comme le soufre ♦.

♦ Voir l'article : la Chimie et Liaison chimique, Covalence.

VALENCE-GRAMME (Valence gram) pages 195, 258.

Masse d'un élément, exprimée en grammes. Elle est donnée par le quotient de la masse atomique A de l'élément par sa valence.
Exemple : le cuivre (A : 63,5) a une valence 2 dans les composés cuivriques (ex. : sulfate de cuivre $CuSO_4$). Une valence-gramme de cuivre est donc constituée par 31,75 g de cuivre.
La valence-gramme permet d'exprimer la loi de l'électrolyse de façon particulièrement simple : 96 500 coulombs libèrent une valence-gramme de métal à la cathode d'un électrolyseur.

VAN DE GRAAF (Robert Jemison) page 250.

Physicien américain, né à Tuscaloosa (Alabama) en 1901.
Ancien élève de Princeton, Van de Graaf devient professeur au Massachusetts Institute of Technology.
Auteur de différents travaux en physique nucléaire, sa principale œuvre est la réalisation des premières grandes machines électrostatiques modernes ♦. C'est grâce à ces machines qui accélèrent les particules électrisées que les transmutations atomiques peuvent se faire.

♦ Voir, ci-dessous : Accélérateurs Van de Graaf, et Générateur Van de Graaf.

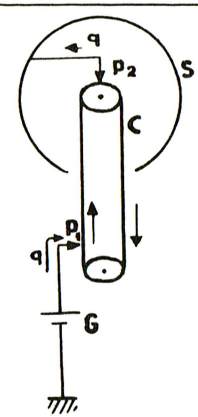
VAN DE GRAAF (Accélérateur) (Van de Graaf accelerator)

C'est un accélérateur simple, où les particules chargées sont soumises au champ électrostatique créé par le générateur Van de Graaf. En fait, il n'est plus guère utilisé seul, mais comme « préaccélérateur » dans les accélérateurs géants. Ainsi le synchrotron Saturne de Saclay est alimenté en protons accélérés — qui ont une énergie de 5,2 MeV ♦ environ — par un « Van de Graaf ».

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

VAN DE GRAAF (Générateur) (Van de Graaf generator)

Le principe de cet appareil est de transporter les charges issues d'un générateur G par une courroie C sur une sphère S de grand diamètre, pouvant prendre ainsi un potentiel très élevé.
Les charges, déposées par le peigne P_1 sur la courroie (isolante) qui monte, sont transportées jusqu'au peigne P_2 en contact avec la sphère. Elles se répartissent alors sur la sphère, et la courroie redescend pratiquement neutre. L'accumulation des charges sur la sphère augmente son potentiel par rapport au sol ; elle atteint parfois dans les très grosses machines plusieurs millions de volts ♦.



S = sphère d'accumulation
C = courroie
P_1, P_2 = peignes
G = générateur auxiliaire
q = charges

VAN DER WAALS (Johannes Diderik) pages 92, 95, 113, 155.

Physicien hollandais, né à Leyde en 1831, mort à Amsterdam en 1923.
Professeur de physique aux universités de La Haye puis d'Amsterdam, Van der Waals reçoit le prix Nobel de physique en 1910. Perfectionnant la théorie cinétique des gaz, il établit l'équation d'état des gaz ♦ (formule de Van der Waals) et découvre la loi des états correspondants. Son principal apport à la science est de mettre en évidence la continuité des états gazeux et liquide. On lui doit, par ailleurs, des travaux sur la dissociation électrolytique et une théorie thermodynamique de la capillarité.

VAN DER WAALS (Forces de) (Van der Waals forces)

Ces forces s'exercent entre molécules. Ayant leur origine dans les charges électriques portées par des molécules globalement neutres, elles sont à très faible rayon d'action, et négligeables au-delà de 1/100 de micron ♦.
Les forces de Van der Waals sont responsables de la cohésion des cristaux moléculaires et des phénomènes de tension superficielle se produisant à la surface des liquides. Elles se font sentir également dans les gaz dont la pression est telle que la distance moyenne entre les molécules soit de l'ordre du rayon d'action de ces forces. Il en résulte des écarts avec les lois simples des gaz parfaits.

♦ Voir Van der Waals (forces de).

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 13.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 14.

L'équation de Van der Waals représente l'état d'un gaz réel ; elle s'écrit pour une mole $\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$, où p est la pression, v, le volume, T, la température, R la constante universelle des gaz parfaits (R = 8,31 J/°K ♦) et $\frac{a}{v^2}$ et b sont des coefficients représentant les corrections que l'équation de Van der Waals apporte à l'équation des gaz parfaits. On voit que, si le volume est grand, p est faible, $\frac{a}{v^2}$ et b deviennent alors négligeables et on retrouve la loi de Mariotte pour les gaz parfaits : $pV = RT$.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, page 14.

VAN'T HOFF (Jacobus Henricus)

Chimiste néerlandais, né à Rotterdam en 1852, mort à Berlin en 1911.
S'intéressant de bonne heure aux sciences, Van't Hoff se passionne en même temps pour la philosophie positiviste ♦ et pour la poésie.
Professeur de chimie à Utrecht, à Amsterdam puis à Berlin, il reçoit en 1901 le premier prix Nobel de chimie.
Développant les principes de la stéréochimie, il met au point la théorie de l'atome asymétrique du carbone ♦. Jetant les bases de la cinétique chimique, il applique les principes de la thermodynamique aux équilibres chimiques. Un des fondateurs de la chimie organique, il développe la théorie des affinités ♦, en mettant en évidence l'analogie entre les solutions et les gaz.
Van't Hoff se distingue, enfin, par ses remarquables travaux sur les solutions diluées et sur la pression osmotique ♦.

Ouvrages essentiels :
Études de dynamique chimique (Muller, Amsterdam, 1884) ;
Dix années dans l'histoire d'une théorie (Bazendijk, Rotterdam, 1887) ;
Leçons de chimie physique (Hermann, Paris, 1898-1899) ;
La chimie physique et ses applications (Hermann, Paris, 1903) ;
Die Lagerung der Atome im Raume (Vieweg und Sohn, Brünswick, 1894) ;
Die Chemischen Grundlehren nach Menge, Mass und Zeit (Vieweg und Sohn, Brünswick, 1912).

♦ Théorie d'Auguste Comte. L'esprit humain, la société passent par trois âges : théologique, métaphysique, positif. Les sciences positives se constituent en rupture avec les deux premiers âges. Comte classe les sciences en mathématique, astronomie, physique, chimie, biologie, sociologie, chacune prenant pour base la précédente et accédant à un plus haut niveau de complexité (ainsi chimie et biologie).

♦ Carbone lié à quatre radicaux différents.

♦ Affinité : travail susceptible d'être fourni lors d'une réaction chimique. Son calcul permet de prévoir une réaction ; en effet, si plusieurs réactions sont possibles, celle qui se produira effectivement est celle qui correspond à l'affinité la plus grande. Pour des réactions s'effectuant à volume constant, l'affinité est mesurée par les variations de la fonction thermodynamique énergie libre F. Pour des réactions à pression constante, elle est mesurée par la fonction enthalpie libre G.

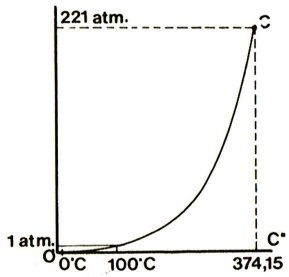
♦ La pression osmotique est la pression qu'exercent les molécules d'un corps dissous. D'après la loi de Van't Hoff, elle est égale, pour des corps non électrolysables, à celle que produiraient les molécules de corps dissous s'il était gazeux et occupait, à la température de l'expérience, le volume de la solution.

VAN'T HOFF (loi de) voir la Chimie page 119 et la page 254.

VAPEUR : voir Vaporisation

VAPORISATION (Vaporization) pages 177, 181, 256, 324, 479, 515, 535, 537.

Passage d'un liquide à l'état de vapeur. La vaporisation peut s'effectuer à toute température comprise entre le point triple et le point critique du corps. Elle s'effectue jusqu'au moment où la vapeur atteint, au-dessus du liquide, une pression dite « pression maximale de vapeur saturante » caractéristique du liquide et de la température d'expérience (on parle aussi de « tension de vapeur saturante »). A ce moment, le liquide est en équilibre avec la vapeur.
On peut ainsi tracer une courbe de vaporisation représentant la tension de vapeur en fonction de la température.
Nous avons représenté cette courbe pour l'eau. On remarque qu'à 100 °C la pression de vapeur saturante est la pression atmosphérique. C'est à cette tempé-



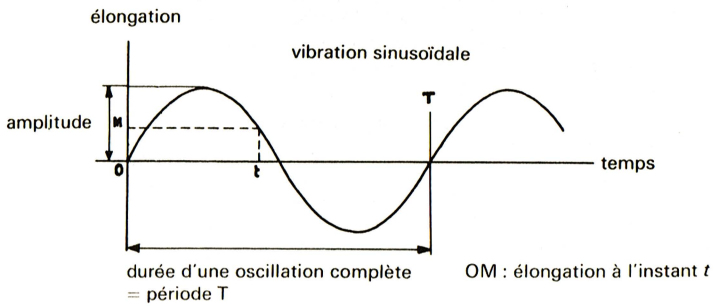
rature que l'eau « bout ». L'ébullition est donc un cas particulier de la vaporisation et se produit lorsque la pression régnant au-dessus du liquide est égale à sa pression de vapeur saturante.
La vaporisation nécessite un apport de chaleur. On définit la « chaleur de vaporisation » comme la quantité de chaleur qu'il faut apporter à l'unité de masse du liquide pour le vaporiser sans changer de température.
Par exemple, la chaleur de vaporisation de l'eau est de 536 calories par gramme à 100° C. Elle est représentée entre 0 et 100° C par la formule de Regnault : $L = 606 - 0{,}69\,t$, où L représente la chaleur de vaporisation exprimée en calories par grammes et t la température en degrés Celsius.

VIBRATOIRE (phénomène) (Vibrational phenomenon)

pages 33, 57, 96, 145, 174, 178, 180, 195, 215, 255, 268, 305, 310, 311, 312, 330, 331, 336, 342, 344, 357, 358, 410, 417, 445, 448, 452, 463, 480, 486, 497, 505, 508, 510, 514, 519, 526, 527.

En mécanique, mouvement au cours duquel un point effectue, de part et d'autre d'une position d'équilibre, des déplacements tels qu'on les retrouve périodiquement dans le même état, c'est-à-dire avec la même élongation (écart avec la position d'équilibre), et avec la même vitesse. Le mouvement du pendule en est un exemple : l'intervalle de temps séparant deux passages consécutifs du point par des états identiques s'appelle la période T du mouvement. C'est la durée d'une vibration ou oscillation complète.
Le nombre de vibrations complètes par unité de temps est la fréquence N du mouvement vibratoire (N : 1/T).

L'amplitude est l'écart maximal du point avec sa position d'équilibre. Par extension, on appellera vibration un phénomène au cours duquel une grandeur subit des variations périodiques autour d'une valeur fixe (les vibrations électriques, par exemple).
On trouve des phénomènes vibratoires dans tous les domaines de la physique : les exemples que nous venons de donner sont des vibrations mécaniques. Le son en est un autre exemple.
Les vibrations électriques donnent naissance aux courants alternatifs et aux ondes hertziennes. La lumière est une vibration électromagnétique analogue aux ondes hertziennes. La vibration la plus simple est la vibration sinusoïdale, c'est-à-dire celle dans laquelle la grandeur variable x (écart d'un point avec sa position d'équilibre, différence de potentiel) varie sinusoïdalement avec le temps t, soit donc suivant une loi de la forme : $x = x_0 \sin \frac{2\pi t}{T}$; dans cette formule, x_0 est l'amplitude (écart maximal) et T la période du phénomène.



Propagation des vibrations

Lorsqu'on agite l'extrémité d'une corde suffisamment longue, on observe que l'ébranlement communiqué à cette extrémité se propage tout le long de la corde : tout point de la corde reproduit ainsi, avec un certain retard, la vibration communiquée à l'extrémité.

On peut ainsi définir, pour chaque milieu, la vitesse de propagation des vibrations (ou célérité). Cette vitesse ne dépend que du milieu de propagation, et non de l'amplitude ou de la fréquence de la vibration. Ainsi, toutes les vibrations sonores se propagent dans l'air (à 0°, sous la pression atmosphérique) à la vitesse de 331m/s. Sur la corde que nous avons prise comme exemple, nous allons trouver, à un instant donné, des points dans le même état : au repos, ou à l'écart maximal en haut, par exemple. Les distances entre points consécutifs sont égales. Elles définissent la longueur d'onde de la vibration ♦.

♦ Voir Longueur d'onde.

Vibrations transversales et vibrations longitudinales

Prenons encore l'exemple de la corde : tenons-la horizontalement, et agitons-la verticalement. La vibration se propage le long de la corde, donc horizontalement. Nous dirons que cette vibration est transversale. Il en sera de même chaque fois qu'on fait propager une vibration perpendiculaire à la direction de propagation. Les rides produites par la chute de gouttes dans l'eau sont également des « ondes » transversales.

Au contraire, si nous imaginons un piston animé d'un mouvement alternatif, produisant des compressions et dépressions successives à l'extrémité d'un tuyau, le gaz du tuyau va propager ces variations de pression, suivant la direction même dans laquelle elles ont été produites. Il s'agit ici de vibrations longitudinales.

Énergie vibratoire

Un système en vibration est en mouvement. Il possède donc de l'énergie mécanique, sous forme d'énergie cinétique et d'énergie potentielle, ces deux formes s'échangeant entre elles sans cesse. L'énergie vibratoire d'un oscillateur est proportionnelle au carré de l'amplitude des oscillations. Cela peut être étendu à tous les oscillateurs (électriques ou autres) ; dans tous les cas, l'énergie résultant de l'oscillation est proportionnelle au carré de l'amplitude. Si les oscillations se propagent, il s'agit en réalité d'un transport d'énergie : le son transporte ainsi de l'énergie mécanique ; c'est elle qui fait trembler les vitres au passage d'un avion à basse altitude. Le courant alternatif est la conséquence d'une oscillation électrique se propageant le long des fils. La lumière est elle-même une onde électromagnétique, véhicule de l'énergie lumineuse.

VIDE (Vacuum) pages 183, 184, 191, 194, 199, 229, 273, 274, 308, 331, 441, 444, 446, 447, 505, 516, 524, 528.

« Absence de matière... », le vide parfait n'existe pas, mais la technique arrive à réaliser, dans des enceintes hermétiques, des vides tels que la pression du gaz résiduel ne dépasse pas le millionième de millimètre de mercure, soit environ 1,3 milliardième de la pression atmosphérique normale.

A ces pressions réduites, les molécules sont si rares que leur parcours moyen entre deux chocs est de l'ordre de plusieurs mètres ♦.

De tels vides sont nécessaires en électronique et en physique des particules, pour éviter le choc des électrons ou des particules sur les molécules du gaz résiduel. Ils sont réalisés par une pompe abaissant la pression au 1/1 000 de mm de mercure (vide primaire), puis par des pompes de types très divers, par exemple à diffusion de mercure, où les molécules sont entraînés par un flux de vapeur de mercure.

♦ A la pression ordinaire, une molécule parcourt environ 1/100 000 cm entre deux chocs.

VITESSE (Speed, Velocity) pages 35, 96, 99, 123, 180, 183, 195, 197, 198, 201, 224, 230, 234, 264, 267, 277, 279, 281, 282, 305, 324, 325, 332, 337, 338, 341, 345, 346, 349, 350, 363, 409, 413, 417, 423, 424, 426, 440, 441, 442, 452, 458, 484, 485, 494, 505, 510, 511, 520, 532, 533, 535.

Espace parcouru pendant l'unité de temps. Plus généralement, on appelle vitesse le rapport de l'espace infiniment petit ds par le temps dt mis pour le parcourir. On représente la vitesse v par un vecteur ♦ tangent à la trajectoire du mobile M considéré, et de longueur proportionnelle au quotient ♦ $\frac{ds}{dt}$.

♦ Voir Aperçu mathématique, page 17.

♦ Pour les mathématiciens $\frac{ds}{dt}$ est la dérivée de l'abscisse curviligne du point M par rapport au temps (voir Aperçu mathématique, page 16).

Composition des vitesses

Les vitesses se composent comme des vecteurs, suivant la règle du parallélogramme. Un bateau, de vitesse $\vec{v}_2$, entraîné par un courant de vitesse $\vec{v}_1$, aura une vitesse $\vec{V}$ donnée en grandeur et direction par la diagonale du parallélogramme construit sur $\vec{v}_1$ et $\vec{v}_2$ comme côtés ♦. En particulier, si $\vec{v}_1$ et $\vec{v}_2$ ont même direction, les vitesses s'ajoutent algébriquement : un bateau remontant le Gange à la vitesse de 10 nœuds (18 km/h) alors que le Gange a un courant de 9 nœuds (16,2 km/h) a une vitesse par rapport à la rive de 1,8 km/h...

Cet exemple montre qu'on ne peut définir une vitesse que par rapport à un repère. Exception à la règle de composition des vitesses : comme l'a montré l'expérience de Michelson, la vitesse de la lumière est indépendante du repère choisi. C'est cette observation qui mit Einstein sur la voie de la théorie de la relativité.

♦ Voir l'article : Électricité et magnétisme, page 188.

Unités de vitesse

Elles dérivent des unités de longueur. L'unité légale est le mètre par seconde ♦.

♦ On utilise aussi le km/h (qu'il ne faut pas écrire « kmh »). Les marins et les aviateurs utilisent le nœud, qui correspond à 1 mille marin par heure (1,852 km/h).

VOLT (Volt) pages 188, 266, 357, 358.

Unité de différence de potentiel (d.d.p.) ou de force électromotrice, ainsi dénommée en l'honneur de Volta.

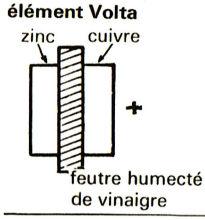
C'est la d.d.p. existant entre deux points d'un circuit tels que la puissance consommée entre ces 2 points soit de 1 watt lorsque le courant a une intensité de 1 ampère.

VOLTA (Alessandro) page 186, 191, 453, 534.

Né à Côme en 1745, mort à Côme en 1819, Physicien italien. Il s'est intéressé très tôt à l'électricité et a soutenu, contre son ami Galvani, une longue controverse sur l'« électricité animale ».

Successivement professeur à l'université de Côme, puis de Pavie, il est surtout connu pour l'invention de la « pile de Volta », premier générateur électrique non basé sur l'électrostatique.
La pile de Volta était un empilement (d'où son nom) de lames de cuivre et de zinc, séparées par du feutre imbibé de vinaigre. La force électromotrice d'un élément ainsi constitué est de l'ordre du volt.
Napoléon avait fait don à l'École polytechnique d'une batterie d'éléments Volta au nombre de 600, ce qui en faisait un outil de recherches très important pour l'époque, puisqu'elle pouvait fournir un courant de 10 ampères sous une tension d'environ 300 volts.

élément Volta



VOYAGEUR DE LANGEVIN : voir Langevin

WATT (James) pages 316, 450.

Ingénieur et mécanicien britannique, né à Greenock (Écosse) en 1736, mort en 1819. Il a apporté à la machine à vapeur de tels perfectionnements que l'industrie l'utilisa pendant le XIXe siècle.

WATT — WATT-HEURE

Le watt (W) ♦ est l'unité de puissance du système international. Il correspond au travail de 1 joule effectué en 1 seconde : 1 W = 1 J/s.

♦ Voir le tableau des symboles et unités, pages 13 et 14.

Le watt-heure est une unité d'énergie, qu'il ne faut pas confondre avec le watt. C'est l'énergie produite ou consommée dans une installation de puissance 1 watt, fonctionnant pendant 1 heure. Comme il y a 3 600 secondes dans 1 heure, 1 Wh vaut 3 600 joules.

WEBER (Wilhelm Eduard) pages 186, 200, 271, 338.

Physicien allemand, né à Wittenberg en 1804, mort à Göttingen en 1891.
Professeur aux universités de Halle, de Leipzig et de Göttingen, Weber fait d'importants apports à la physique en matière d'électricité et d'électromagnétisme. A la suite de mesures relatives au magnétisme terrestre, il énonce en 1846 la loi concernant les forces exercées par les particules électrisées en mouvement. Il démontre ensuite que le rapport des unités électrostatiques aux unités électromagnétiques est égal à la vitesse de la lumière, posant ainsi les bases de la théorie électromagnétique de la lumière. On lui doit aussi une analyse de l'induction électromagnétique et une étude des phénomènes diamagnétiques. Inventeur aussi bien que théoricien, Weber réalise, en collaboration avec Gauss, un télégraphe électrique (1833). C'est également lui le constructeur du premier électrodynamomètre.

Ouvrages essentiels :

Werke (œuvres) (Springer, Berlin, 1892-1894).
Atlas des Erdmagnetismus nach den Elementen der Theorie Entworfen (Weilmann, Leipzig, 1840) ;
Fünf Abhandlungen über absolute Elektrische Strom- und Widerstands-Messung (Engelmann, Leipzig, 1904).

WEHNELT pages 91, 212.

WEISS (Pierre) page 202.

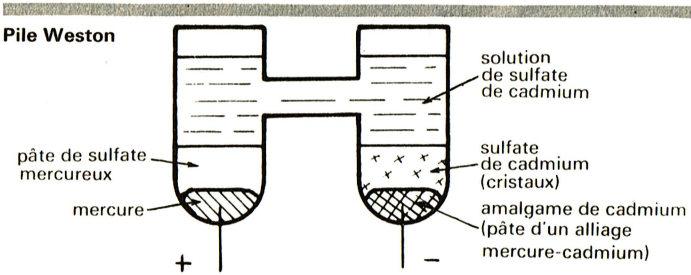
Physicien français, né à Mulhouse en 1865, mort à Lyon en 1940.
Élève, puis professeur à l'École polytechnique de Zurich, Weiss couronne sa carrière universitaire comme professeur et directeur de l'Institut de physique à l'université de Strasbourg. Membre de l'Académie des sciences, il s'est surtout consacré au problème du magnétisme. A la suite d'expériences effectuées à partir de 1896, il établit les relations entre le magnétisme et les caractères structuraux de corps cristallisés. En 1911, il définit empiriquement le magnéton (moment magnétique élémentaire) et étudiera ensuite les corps ferromagnétiques à des températures inférieures au point de Curie.

Ouvrages essentiels :
Recherches sur l'aimantation de la magnétite cristalline (Carré, Paris, 1896) ;
Les Progrès récents de l'éclairage électrique (Imp. de Deslis, Tours, 1905) ;
Mesure du phénomène de Zeemann pour les trois raies bleues du zinc (Imp. de Deslis, Tours, 1907) ;
L'Hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique (Imp. de Deslis, Tours, 1907) ;
Chaleur spécifique et champ moléculaire des substances ferromagnétiques (Imp. de Deslis, Tours, 1908) ;
Mesure de l'intensité d'aimantation à saturation en valeur absolue (Imp. de Deslis, Tours, 1910) ;
Recherches sur l'aimantation aux très basses températures (Imp. de Deslis, Tours, 1910) ;
Sur la rationalité des rapports des moments magnétiques moléculaires et le magnéton (ext. du « Journal de Physique », Paris, nov. et déc. 1911) ;
Le Magnétisme (A. Colin, Paris, 1951).

WESTON (Edward)

Ingénieur électricien britannique, né à Londres en 1850, mort à Montclair (U.S.A.) en 1936.
Émigrant à vingt ans aux États-Unis, Weston y devient célèbre en construisant la première dynamo dont le fonctionnement soit parfait. En 1875, il monte une usine de fabrication de dynamos qui connaît un vif succès. Par ailleurs, il invente et fabrique plusieurs instruments de mesure électriques, dont la pile Weston.

Pile Weston



WESTON (Élément) (Weston cell)

Type de pile fournissant une force électromotrice suffisamment bien définie pour qu'elle puisse servir d'étalon.
C'est une pile à deux liquides.
Elle a une force électromotrice de 1,0186 volt à 20°C.

WILSON (Charles Thomson Rees) page 33.

Physicien écossais, né à Glencorse en 1869, mort à Carlops en 1959.
Élève de Maxwell au laboratoire Cavendish de Cambridge, il est ensuite nommé professeur d'histoire naturelle dans cette même ville et élu membre de la Royal Society.
Entre 1895 et 1911, Wilson étudie l'atmosphère : le phénomène de formation des nuages par condensation de l'eau l'amène à reconnaître que la formation des gouttelettes s'effectue autour des ions présents dans l'atmosphère et à pressentir l'existence des rayons cosmiques.
L'expérience acquise dans ces domaines le conduit à la mise au point, en 1912, de la célèbre chambre de Wilson, largement utilisée dans l'étude des particules élémentaires, et qui a permis d'importantes découvertes. C'est pour cette invention que Wilson a reçu, en 1927, le prix Nobel de physique.

WILSON (Chambre de) : voir Chambre de Wilson

X (Rayons) : voir Rayons

YOUNG (Thomas) page 312, 331, 372.

Médecin et physicien anglais, né à Milverton (Somersetshire) en 1773, mort à Londres en 1829.
Tout en exerçant la profession de médecin, Young obtient une chaire de philosophie à Cambridge, puis à Londres. Remarquable polyglotte, il s'acquiert également une grande renommée en égyptologie par ses contributions au déchiffrage des hiéroglyphes.
Cet étonnant savant et érudit est l'auteur d'un certain nombre de travaux en optique qui contribueront à établir la théorie ondulatoire de la lumière.
Il découvre et formule en 1801 le principe de l'interférence de la lumière. Fondateur de l'optique physiologique, il explique la façon dont le cristallin s'accommode pour la vision à différentes distances et met en évidence l'astigmatisme. Il est par ailleurs le premier à donner au mot « énergie » son sens scientifique et laisse son nom au module de Young en élasticité ♦.

♦ Voir Cryogénie.

Ouvrages essentiels :
Œuvres ophtalmologiques (A.F. Höst, Copenhague, 1894) ;
A Syllabus of a Course of Lectures on Natural and Experimental Philosophy (Savage, Londres, 1802) ;
On the Theory of Light and Colours (Bulmer, Londres, 1802).

YUKAWA (Hideki) pages 46, 103, 340, 349, 422, 423, 425.

Physicien japonais, né à Tokyo en 1907.
Savant extrêmement doué, Yukawa poursuit des recherches en physique théorique,

parallèlement à une brillante carrière. Professeur à l'université de Kyoto, puis directeur du récent Institut de recherches en physique fondamentale dans la même ville, il détient entre-temps une chaire de physique théorique à l'université de Columbia, aux États-Unis. Il reçoit le prix Nobel de physique en 1949.

La grande découverte de Yukawa est celle du méson. Il en émet l'hypothèse en 1935. Deux ans plus tard, des physiciens américains le mettent en évidence dans les rayons cosmiques. Yukawa, dès lors célèbre, se consacre à l'étude de cette particule instable, calcule sa masse et sa durée de vie moyenne. Par la suite, il oriente ses recherches vers une théorie plus vaste des particules élémentaires.

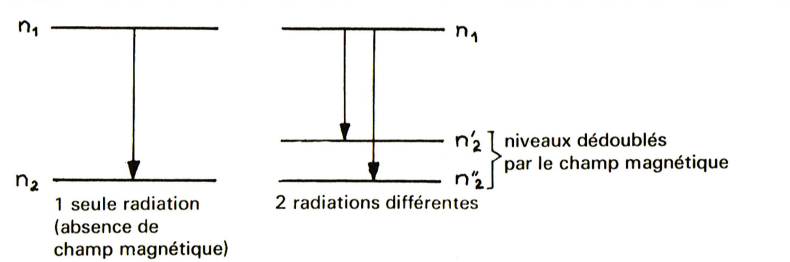
ZEEMAN (Pieter) page 330.

Physicien hollandais, né à Zonnemaire (Zélande) en 1865, mort à Amsterdam en 1943.
Docteur ès sciences mathématiques et physiques de l'université de Leyde, Zeeman poursuit une carrière universitaire à Amsterdam. Sa grande contribution à la physique est la découverte de l'effet Zeeman (décomposition des raies d'un spectre de lignes sous l'influence d'un champ magnétique). Ce principe confirme la théorie électronique et se révélera d'une très grande utilité en optique et en astrophysique. Par ailleurs, Zeeman fait des recherches sur la propagation de la lumière dans les milieux en mouvement et confirme, par ses résultats, la théorie relativiste.
Il reçoit le prix Nobel de physique en 1902, avec Lorentz.

Ouvrage essentiel :
Le Cas général de la décomposition magnétique des raies spectrales (Imp. de Deslis, Tours, 1911).

ZEEMAN (Effet) (Zeeman effect)

Le spectre d'émission d'un corps (produit par la décharge électrique dans un gaz, par exemple) est composé d'un certain nombre de raies, dont chacune correspond à la transition d'un électron entre deux niveaux d'énergie. Si l'on fait agir un champ magnétique, on constate une division de chaque raie en deux, ou plus. C'est l'effet Zeeman.
Le champ magnétique a pour effet de substituer à chaque niveau d'énergie un certain nombre de sous-niveaux, correspondant à des orbites différemment orientées par rapport au champ magnétique et auxquelles sont attachés des niveaux d'énergie légèrement différents du niveau initial. Il en résulte que le passage d'un électron d'un niveau n_1 à ce niveau n_2 est remplacé par le passage de n_1

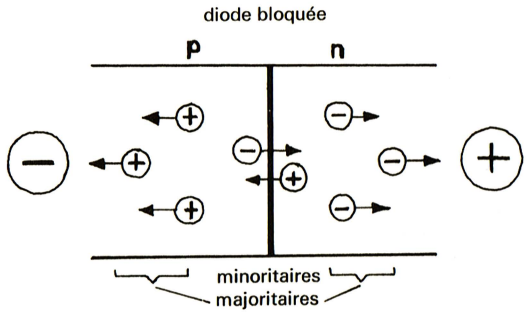


à un des sous-niveaux n'_2 ou n''_2, et correspond à une variation d'énergie qui n'est pas la même dans l'un et l'autre cas ; ce passage donne donc des raies spectrales de longueurs d'onde différentes.
Les orientations des orbites sont soumises aux règles de quantification, par l'intervention du nombre quantique magnétique m.

ZENER (effet) (Zener effect)

Dans une diode à semi-conducteur ♦, le courant est la somme de deux courants opposés : le courant dû aux porteurs de charge majoritaires (électrons dans la région n et trous dans la région p) et le courant dû aux minoritaires.
Si la diode est bloquée, seul subsiste le courant dû aux minoritaires, et il est le plus souvent négligeable.
Pour une tension suffisante se produit l'effet Zener : les minoritaires ont une énergie cinétique suffisante pour ioniser les atomes au repos, provoquant une « avalanche » d'électrons et de trous, dont le résultat est un courant important, pouvant détruire la diode si elle est insuffisamment refroidie.
Dans une diode Zener, on utilise cet effet pour stabiliser une tension à la valeur qui déclenche l'avalanche.

♦ Se reporter à l'article : l'Électronique, pages 236 à 238.



ZÉRO ABSOLU (Absolute zero) pages 167, 203, 353, 412, 514, 515, 517.

Température la plus basse qu'on puisse théoriquement atteindre. Correspondant à — 273,15°C, c'est l'origine de l'échelle absolue des températures. On arrive à obtenir maintenant des températures de l'ordre du centième de degré absolu, mais il est illusoire d'espérer atteindre le zéro, qu'on doit considérer comme une limite théorique et, de ce fait, inaccessible.

ZWORYKIN (Vladimir Kosma)

Ingénieur russe nationalisé américain, né à Mourom en 1889.
Après des études à Saint-Pétersbourg, où il effectue des expériences de télévision, Zworykin vient à Paris étudier les rayons X sous la direction de Langevin, puis s'installe aux États-Unis et y devient directeur des recherches à la Radio Corporation.
Célèbre pour son invention de l'iconoscope (1934), tube à rayons cathodiques qui est à l'origine de toutes les caméras modernes de télévision, qu'il perfectionne

au cours des années, il fait faire de grands progrès à la télévision. Il poursuit par ailleurs des recherches en optique électronique, contribue à la réalisation des multiplicateurs électroniques et perfectionne le microscope électronique. Se consacrant depuis 1954 à l'électronique médicale, il fonda un centre consacré à cette matière.

Ouvrages essentiels :

Les Cellules photoélectriques et leurs applications (Dunod, Paris, 1937) ;
L'Optique électronique et ses applications. Multiplicateurs d'électrons (Chiron, Paris, 1939) ;
La Photoélectricité et ses applications (Dunod, Paris, 1953).

Index *Anglais-Français*

A

Absolute zero : Zéro absolu
Acid : Acide
Acoustics : Acoustique
Aerial : Antenne
Aerodynamics : Aérodynamique
Alternator : Alternateur
Ampere : Ampère
Amplitude : Amplitude
Analysis : Analyse
Anelectrode : Anode
Annihilation : Annihilation
Anode : Anode
Antiferromagnetism : Antiferromagnétisme
Antiparticle : Antiparticule
Archimede's principle : Théorème d'Archimède
Atom : Atome
Atomic mass : Masse atomique
Atomic number : Nombre atomique
Automation : Automation
Avogadro's constant : Nombre d'Avogadro

B

Baryon : Baryon
Baryonic number : Nombre baryonique
Base : Base
Battery : Pile
Bethe's cycle : Cycle de Bethe
Binary calculation : Calcul binaire
Birefringence : Biréfringence
Black body : Corps noir
Bomb : Bombe
Bombardment : Bombardement
Boson : Boson
Bragg's law : Relation de Bragg
Brownian movement : Mouvement brownien
Bubbles chamber : Chambre à bulles

C

Carbon : Carbone
Carnot's axiom : Théorème de Carnot
Carnot's principle : Principe de Carnot
Casing : Gainage
Catalysis : Catalyse
Cathode : Cathode
Cathode rays : Rayons cathodiques
Cathode-ray oscilloscope : Oscillographe cathodique
Cathode tube : Tube cathodique
Cathodic : Cathodique
Cathodic reaction : Réduction cathodique
Celerity : Célérité
Central : Centrale
Cerenkov effect : Effet Cerenkov
Charge : Charge
Charge bearers : Porteurs de charge
Chemical function : Fonction chimique
Chemical kinetics : Cinétique chimique
Chemical link : Liaison chimique
Chemical reaction : Réaction chimique
Cloud chamber : Chambre de Wilson
Coherence : Cohérence
Colour : Couleur
Comburent : Comburant
Combustion : Combustion
Compressibility : Compressibilité
Compression : Compression
Compton effect : Effet Compton
Computer : Ordinateur
Computer science : Informatique
Condenser : Condensateur
Conductivity : Conductivité
Conversion : Conversion
Corrosion : Corrosion
Cosmic rays : Rayons cosmiques
Coulomb : Coulomb
Counter : Compteur
Critical mass : Masse critique
Critical point : Point critique
Crookes'tube : Tube de Crookes
Cryogenics : Cryogénie
Crystal : Cristal
Crystallization : Cristallisation
Curie : Curie
Curie point : Point de Curie
Cybernetics : Cybernétique
Cycle : Cycle
Cyclotron : Cyclotron

D

Dating : Datation
Diffraction : Diffraction
Diode : Diode
Discontinuous : Discontinu
Disintegration : Désintégration
Distillation : Distillation
Doping : Dopage
Doppler effect : Effet Doppler
Drag : Traînée
Dynamics : Dynamique
Dynamo : Dynamo

E

Ebullition : Ebullition
Einstein's relation : Relation d'Einstein
Electric current : Courant électrique
Electricity : Électricité
Electrode : Électrode
Electrolysis : Électrolyse
Electrolyte : Électrolyte
Electromagnetic field : Champ électromagnétique
Electromagnetic radiation : Rayonnement électromagnétique
Electromagnetism : Électromagnétisme
Electromotive force : Force électromotrice
Electron : Électron
Electron gun : Canon à électrons
Electron microscope : Microscope électronique
Electron shells : Couches électroniques
Electron-volt : Électron-volt
Electronic tube : Tube électronique
Electrostatics : Électrostatique
Element : Élément
Endothermic : Endothermique ou Endoénergétique
Energy : Énergie
Energy levels : Niveaux d'énergie
Entropy : Entropie
Equilibrium : Équilibre
Equivalence principle : Principe d'équivalence
Ester : Ester
Ether : Ether
Evaporation : Évaporation
Exothermic : Exothermique, Exoénergétique
Expansion : Détente, dilatation

F

Faraday : Faraday
Faraday cage : Cage de Faraday
Faraday's law of electrolysis : Loi de Faraday
Fermi constant : Constante de Fermi
Fermi-Dirac statistics : Statistique Fermi-Dirac
Fermi level : Niveau de Fermi
Fermion : Fermion
Ferrimagnetism : Ferrimagnétisme
Ferromagnetism : Ferromagnétisme
Feynman's diagram : Diagramme de Feynman
Field : Champ
Fission : Fission
Fluid : Fluid
Fluorescence : Fluorescence
Force : Force
Foucault currents : Courants de Foucault
Frequency : Fréquence
Fresnel lens : Miroirs de Fresnel
Fuel : Combustible
Fuel battery : Pile à combustible
Fusion : Fusion

G

Gamma rays : Rayons gamma
Gauss : Gauss
Generator : Générateur
Geometric optics : Optique géométrique
Germanium : Germanium
Gravitation : Gravitation
Gravity : Pesanteur

H

Hadron : Hadron
Hall effect : Effet Hall
Heat : Chaleur
Heavy water : Eau lourde
Heisenberg uncertainty principle : Relation d'incertitude d'Heisenberg
Hertzian waves : Ondes hertziennes
Hologram : Hologramme
Holograph : Holographie
Huygens' principle : Principe de Huygens
Hydrodynamics : Hydrodynamique
Hydrogen : Hydrogène
Hypercharge : Hypercharge
Hyperon : Hypéron
Hysteresis : Hystérésis

J

Joule's law : Effet Joule
Joule : Joule
Junction : Jonction

I

Impedance : Impédance
Induction : Induction
Inertia : Inertie
Infrared radiation : Infrarouge
Inorganic chemistry : Chimie minérale
Insulating substance : Isolant
Intensity : Intensité
Interaction : Interaction
Interference : Interférence
Ion : Ion
Ion chamber : Chambre d'ionisation
Ion exchange : Ionisation
Ionic structures : Edifices ioniques
Irradiation : Irradiation
Isotope : Isotope

K

Kinetic theory of gases : Théorie cinétique des gaz
Klystron : Klystron
K mesons : Mésons K

L

Lens : Lentille
Lepton : Lepton
Leptonic number : Nombre leptonique
Lift : Portance
Light : Lumière
Lineal accelerator : Accélérateur linéaire
Liquefaction : Liquéfaction
Liquid state : État liquide
Lorentz transformations : Transformations de Lorentz
Luminescence : Luminescence

M

Mach number : Nombre de Mach
Macromolecule : Macromolécule
Magic numbers : Nombres magiques
Magnetic permeability : Perméabilité magnétique
Magnetic resonance : Résonance magnétique
Magnetism : Magnétisme
Magnetization : Aimantation
Magnetohydrodynamics : Magnétohydrodynamique
Magneton : Magnéton
Mass : Masse
Mass number : Nombre de masse
Mass spectrograph : Spectrographe de masse
Matter : Matière
Measurement : Dimension
Mechanics : Mécanique
Memories : Mémoires
Meson : Méson
Metal : Métal
Metalloids : Non-métaux
Michelson-Morley experiment : Expérience de Michelson et Morley
Microanalyser : Microanalyseur
Microphone : Microphone
Microscope : Microscope
Mirror : Miroir
Moderator : Modérateur
Modulation : Modulation
Mole : Mole
Molecule : Molécule
Molecular orbitals : Orbitales moléculaires
Moment : Moment
Momentum impulse : Quantité de mouvement
Monochromatic radiation : Monochromatisme
Mossbauer effect : Effet Mossbauer
Motor-fuel : Carburant
Motor : Moteur
Movement : Mouvement
Mu meson : Muon
Muonium : Muonium

N

Neutrino : Neutrino
Neutron : Neutron
Noble gases : Gaz rares
Nuclear : Nucléaire
Nuclear energy : Énergie nucléaire
Nuclear fuel : Combustible nucléaire
Nuclear magnetism : Magnétisme nucléaire
Nuclear reactor : Réacteur nucléaire
Nucleon : Nucléon
Nucleus : Noyau
Nuclide : Nuclide

O

Ohm : Ohm
Ohm's law : Loi d'Ohm
Optic fibres : Fibres optiques
Optical pumping : Pompage optique
Orbitals : Orbitales
Organic chemistry : Chimie organique
Oscillator : Oscillateur
Oscillograph : Oscillographe
Output : Rendement
Oxydizer : Oxydant
Oxydizing : Oxydation
Oxydo-reduction : Oxydo-réduction

P

Paramagnetism : Paramagnétisme
Parity : Parité
Particles : Particules
Particles accelerator : Accélérateur de particules
Pascal : Pascal
Pauli exclusion principle : Principe d'exclusion de Pauli
Pendulum : Pendule
Permittivity : Permittivité
Period : Période
Periodic classification : Classification périodique
Periodical : Périodique
Piezoelectricity : Piézoélectricité
Phase : Phase
Phonon : Phonon
Phosphorescence : Phosphorescence
Photocell : Photopile
Photoelectric cell : Cellule photoélectrique
Photoelectronic effect : Effet photoélectronique
Photography : Photographie
Photometry : Photométrie
Photomultiplier : Photomultiplicateur
Photon : Photon
Planck's constant : Constante de Planck
Plastics : Plastiques
Plutonium : Plutonium
Polarization : Polarisation
Polarization of a vibration : Polarisation d'une vibration
Polymerization : Polymerisation
Positron : Positron
Potential : Potentiel
Precipitation : Précipitation
Pressure : Pression
Principle : Principe
Principles of conservation : Lois de conservation
Printed circuits : Circuits intégrés
Prism : Prisme
Propagation : Propagation
Proton : Proton
Pure sound : Son pur

Q

Quantic electrodynamics : Électrodynamique quantique
Quantification : Quantification
Quantum : Quantum
Quantum numbers : Nombres quantiques
Quark : Quark
Quartz : Quartz
Quasi-particles : Quasi-particules

R

Radar scanner : Antenne
Radiation : Radiation
Radioactive decays : Déchets radioactifs
Radioactive elements : Éléments radioactifs
Radioactive equilibrium : Équilibre radioactif
Radioactive fall out : Retombée radioactive
Radioactive period : Période radioactive
Radioactive series : Séries radioactives
Radioactivity : Radioactivité
Rainbow : Arc-en-ciel
Ray : Rayon
Reactor : Réacteur
Reaction : Réaction
Reducing : Réducteur
Reduction : Réduction
Refining : Raffinage
Reflexion : Réflexion
Refracting : Réfringent
Refraction : Réfraction
Relativity : Relativité
Resistance : Résistance
Resistivity : Résistivité
Resonance : Résonance
Reticular energy : Énergie réticulaire
Retorting : Distillation
Rocket : Fusée

S

Schrödinger's equation : Équation de Schrödinger
Semiconductors : Semi-conducteurs
Silicon : Silicium
Size : Dimension
Solid : Solid
Solidification : Solidification
Solution : Solution
Sound : Son
Sounding pipes : Tuyaux sonores
Sound spectrum : Spectre sonore
Sound wall : Mur du son
Space : Espace
Spectral line : Raie spectrale
Spectrograph : Spectrographe
Spectroscopy : Spectroscopie
Spectrum : Spectre
Speed : Vitesse
State : Etat
Statics : Statique
Statistics : Statistique
Strangeness : Étrangeté
Sublimation : Sublimation
Superconductivity : Supraconductivité
Surface tension : Tension superficielle
Symmetry : Symétrie
Synchrocyclotron : Synchrocyclotron
Synchrotron : Synchrotron
Synthesis : Synthèse
System : Système, réseau

T

Telescope : Télescope
Television : Télévision
Temperature : Température
Timbre : Timbre
Thermal conductivity : Conductibilité thermique
Thermochemistry : Thermochimie
Thermodynamics : Thermodynamique
Thermoelectric effect : Effet thermoélectrique
Thermoelectronic effect : Effet thermoélectronique
Thermometer : Thermomètre
Thermometry : Thermométrie
Thorium : Thorium
Time : Temps
Tracer : Traceur
Transformer : Transformateur
Transition : Transition
Transition elements : Éléments de transition
Transmutation : Transmutation
Triple point : Point triple
Transuranium elements : Transuraniens
Tunnel effect : Effet tunnel
Turbine : Turbine
Turbo-compressor : Turbocompresseur
Turbo-propeller : Turbopropulseur
Turbo-reactor :
Turbo-reactor : Turboréacteur

U

Ultrasonics : Ultrasons
Ultraviolet : Ultraviolet
United field theory : Théorie unitaire
Unit : Unité
Uranium : Uranium

V

Vacuum : Vide
Valence : Valence
Valence-gram : Valence-gramme
Van de Graaf accelerator : Accélérateur Van de Graaf
Van de Graaf generator : Générateur Van de Graaf
Van der Waals forces : Forces de Van der Waals
Vaporization : Vaporisation
Vibrational phenomenon : Phénomène vibratoire
Velocity : Vitesse
Volt : Volt

X

X-Rays : Rayons X

Cet ouvrage
a été imprimé sur les presses
des Petits-Fils de Léonard Danel
Maîtres imprimeurs à Loos-lez-Lille

n° d'éditeur 25
n° d'imprimeur 6254
Dépôt légal : 2e trimestre 1971.

La structure Algo-livre,
décrite pages 6 et 7,
est protégée par plusieurs brevets.

▣ Ces articles essentiels, ainsi que tous les autres articles (au nombre de quelques centaines), sont classés, dans le corps du volume, alphabétiquement.

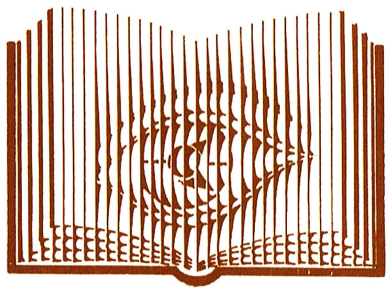
Il suffit, pour les trouver, de feuilleter ce livre en repérant les trois lettres imprimées en haut et à droite de chaque page (de droite) qui correspondent aux trois premières lettres des mots définis dans cette page.

▣ Chaque mot important, donnant lieu à un article, est repéré tout le long de l'ouvrage par deux types de signaux :

des *« soulignés » :* tout *souligné* sous un mot indique que ce mot est le sujet d'un article; si vous voulez en savoir plus sur ce terme, il vous suffit de rechercher l'article correspondant, classé, rappelons-le, alphabétiquement;

des *« index intégrés »*, indiquant à la suite de chaque mot-titre d'un article les numéros des autres pages de l'ouvrage où figure ce même mot.

En « jouant » avec les « soulignés » et les « index intégrés », vous pouvez lire la totalité des textes de cet ouvrage, mais dans l'ordre correspondant à vos curiosités, à vos besoins personnels.



Centre d'Étude et de Promotion de la Lecture